

**Titre:** Développement d'indicateurs de performance sur les opérations d'épandage de fondants et d'abrasifs sur réseau routier à partir de données de télémétrie  
**Title:**

**Auteur:** Chahid Ahabchane  
**Author:**

**Date:** 2015

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Ahabchane, C. (2015). Développement d'indicateurs de performance sur les opérations d'épandage de fondants et d'abrasifs sur réseau routier à partir de données de télémétrie [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2039/>  
**Citation:**

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/2039/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de recherche:** Martin Trépanier, & André Langevin  
**Advisors:**

**Programme:** Maîtrise en génie industriel  
**Program:**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS DE PERFORMANCE SUR LES OPÉRATIONS  
D'ÉPANDAGE DE FONDANTS ET D'ABRASIFS SUR RÉSEAU ROUTIER À PARTIR DE  
DONNÉES DE TÉLÉMÉTRIE

CHAHID AHABCHANE

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE INDUSTRIEL)

DÉCEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS DE PERFORMANCE SUR LES OPÉRATIONS  
D'ÉPANDAGE DE FONDANTS ET D'ABRASIFS SUR RÉSEAU ROUTIER À PARTIR DE  
DONNÉES DE TÉLÉMÉTRIE

présenté par : AHABCHANE Chahid

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. AGARD Bruno, Doctorat, président

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph. D, membre et directeur de recherche

M. LANGÉVIN André, Ph. D, membre et codirecteur de recherche

Mme PERRIER Nathalie, Ph. D, membre

## REMERCIEMENTS

Je remercie mes directeurs de recherche, les professeurs Martin Trépanier et André Langevin, pour leur soutien, leur encouragement et leur disponibilité régulière. De même que pour leurs compétences, aussi bien en ce qui concerne les aspects scientifiques que méthodologiques de la recherche.

Je tiens à remercier également les professeurs Bruno Agard et Bernard Clément pour leur aide et leur disponibilité, surtout dans les modèles de prédiction.

Je désire remercier les importantes contributions de Christian Bérubé, de la ville de Granby, Serge Hamel, de nXstream, Marco Dubé, de Form-Éval, ainsi que François Poulin de Isaac Instruments. Le projet a été financé par le Fonds de recherche Nature et technologies du Québec (projet de recherche en équipe 2015-PR-181381).

## RÉSUMÉ

Aujourd'hui, la plupart des véhicules dédiés aux opérations de déneigements sont équipés de systèmes embarqués qui permettent d'enregistrer des quantités énormes des données. Pourtant, ces données sont souvent sous-exploitées. Le but de ce projet de recherche est d'analyser ces données et de développer des indicateurs de performance sur les opérations d'épandage sur le réseau routier, ce qui permettra aux responsables d'une part d'avoir une vision très claire sur ces opérations avec plus de précision et de détails, et d'autre part d'évaluer les mesures de performance pour chaque segment de rue et pour chaque secteur.

Pour ce projet, nous avons examiné des données collectées par les systèmes embarqués dans les camions d'épandage de la ville de Granby. D'abord nous avons obtenu les données touchant la journée du 11 mars 2014, qui représente 549 930 enregistrements répartis sur 11 véhicules en plus les véhicules des contractants, ensuite nous avons obtenu les données de télémétrie pour une période de déneigement complète. Ces données touchent la saison 2014-2015 et comportent 29,1 millions d'enregistrements sur 12 véhicules.

Ce mémoire propose dans la première phase plusieurs indicateurs qui sont pertinents pour l'analyse des opérations d'épandage sur chaque segment de rue : des indicateurs qui traitent les quantités de fondant et d'abrasifs comme quantités épandues et quantités normalisées, des indicateurs qui traitent les vitesses associées à chaque segment comme vitesse moyenne des camions vitesse moyenne des camions durant l'opération d'épandage, des indicateurs qui traitent le temps total et le temps d'épandage passé sur chaque segment et un indicateur qui calcule la consommation moyenne de carburant.

Aussi, des indicateurs de performances dédiés spécialement aux secteurs : des indicateurs semblables à ce qu'on a présenté pour les segments de rue comme quantités épandues, quantités normalisées, consommation moyenne, temps passé dans chaque secteur, temps d'épandage basé sur les vitesses moyennes. On présente également d'autres indicateurs comme le taux de service qui donne le rapport entre le temps nécessaire pour les opérations d'épandage par rapport au temps total des tournées. Le taux d'épandage est calculé en divisant le nombre de kilomètres traités par le nombre total de kilomètres dans le même secteur et l'efficacité des tournées compare la longueur des passages effectués sur la longueur totale des segments routiers du secteur.

On propose également une méthode, pour estimer le nombre de passages de véhicules sur chaque segment de rue, basée sur la vitesse moyenne. Cet indicateur est très utile pour la ville qui n'est pas capable de déterminer le nombre de passages des camions par rue; cet indicateur va aussi servir pour calculer d'autres indicateurs liés aux secteurs. Tous ces indicateurs de performance seront visualisés sur la carte de la ville afin de comprendre l'importance de chaque indicateur.

Dans la deuxième phase, nous proposons trois modèles de prédiction pour estimer la quantité de fondants et d'abrasifs pour chaque segment de rue : régression multiple, réseaux de neurones, et arbre de décisions.

En utilisant trois types de données (données attachées aux rues, données météorologiques et données de télémétrie), les résultats n'étaient pas assez satisfaisants pour les modèles de régression multiple et arbre de décisions. Ceci est expliqué par le manque de données météorologiques. Par contre le modèle de réseau de neurones était moyennement satisfaisant avec un taux de validation de 75%. Aussi, il faut mentionner que nos modèles de prédiction sont les premiers modèles qui estiment la quantité de sel avec autant de précision (pour chaque segment de rue).

## **ABSTRACT**

Nowadays most of snow removal vehicles are equipped with on-board systems that store huge quantities of data. However, these data are often underused. The aim of this research project is to analyze these data and to develop performance indicators for spreading operations on the road network, which will allow managers firstly to have a very clear vision about these operations with more precision and details, and secondly to assess the performance measures for each street segment and for each sector.

For this project, we examined data collected by onboard systems in spreading trucks of Granby city, first we obtained data regarding March 11, 2014 representing 549,930 records spread over more than 11 city vehicles and vehicles of contractors, then we got the telemetry data of a complete snow removal season. These data concern the 2014-2015 season and includes 29.1 million records for 12 vehicles.

This thesis proposes in the first phase several indicators for each street segment that are relevant to the analysis of spreading operations: indicators showing quantities of chemicals and abrasives as amount applied and standardized amounts, indicators which address the speeds associated with each segment as the truck average speed and the truck average speeds during the spreading operation, indicators treating the total time and spreading time spent by each truck and an indicator which calculates the average fuel consumption.

Also, performance indicators dedicated specifically for sectors: indicators similar to what has been presented for the street segments such amounts applied, standardized amounts, average fuel consumption, time spent in each sectors, spreading time based on average speeds. We presents other indicators as the service rate that shows the relationship between the time required for spreading on the total time, the application rate which calculates the number of serviced kilometers in relation to the total number of kilometers in the same sector and the efficiency of routes compares the length of the passages performed over the entire length of the road segments of the sector.

We propose as well a method to estimate the number of vehicle passages on each street segment based on average speed. This indicator is very useful because the city can't determine the number of trucks traversing the streets. This indicator will also be used to calculate sector indicators. All

these performance indicators will be visualized on the map of the city in order to understand the importance of each indicator.

In the second phase, we present tree prediction models to estimate the amount of chemicals and abrasives for each street segment: multiple regression, neural networks, decision tree.

Using three types of data (data attached to streets, weather data and telemetry data), the results were not satisfying enough for multiple regression models and decision tree which is explained by the lack of meteorological data. However, by the neural networks model was moderately satisfactory with a validation rate of 75%. Also, it should be mentioned that our prediction models were the first models that estimate the amount of salt for such precision (each street segment).



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT .....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	5
2.1 Les opérations de déneigement .....	5
2.1.1 L'épandage .....	5
2.1.2 Le déblaiement .....	7
2.1.3 Le chargement et l'élimination .....	8
2.2 Les systèmes d'information géographique.....	9
2.2.1 Définition .....	9
2.2.2 L'utilisation de SIG dans les opérations de déneigement .....	10
2.3 Les indicateurs de performances .....	12
2.3.1 Définition .....	12
2.3.2 Les indicateurs de performance liés au déneigement.....	12
2.4 Les modèles de prédiction dans le domaine de déneigement .....	15
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	17
3.1 Sources de données .....	17

3.2	Méthode de traitement.....	18
3.2.1	Utilisation d'un SIG .....	19
3.2.2	Précision des lectures GPS .....	19
3.2.3	Appariement au réseau routier .....	20
3.2.4	Traitement des données .....	21
3.3	Indicateurs de performance .....	22
3.3.1	Indicateurs de performance par segment de rue.....	22
3.3.2	Nombre de passages .....	25
3.3.3	Indicateurs de performance par secteur.....	28
3.4	Élaboration des modèles.....	32
3.4.1	Données attachées au segment de rues.....	32
3.4.2	Données météorologiques .....	33
3.4.3	Données de télémétrie .....	33
3.4.4	Outils de modélisation.....	33
CHAPITRE 4	RÉSULTATS .....	37
4.1	Les mesures des indicateurs .....	37
4.1.1	Mesures de performance par secteur .....	37
4.1.2	Mesures de performance par segment de rue .....	38
4.2	Visualisation des indicateurs de performance par segment de rue.....	40
4.2.1	Quantités épandues.....	40
4.2.2	Quantités normalisées .....	41
4.2.3	Temps total passé .....	42
4.2.4	Vitesse moyenne d'épandage .....	43
4.2.5	Vitesse moyenne .....	43

4.2.6	Consommation moyenne.....	44
4.2.7	Temps d'épandage basé sur la vitesse moyenne .....	45
4.2.8	Nombre de passages .....	46
4.3	Visualisation des indicateurs de performance par secteur .....	47
4.3.1	Quantités épandues.....	48
4.3.2	Quantités normalisées .....	48
4.3.3	Consommation moyenne.....	49
4.3.4	Taux de service.....	50
4.3.5	Efficacité des tournées .....	51
4.3.6	Taux d'épandage .....	52
4.3.7	Temps d'épandage basé sur les vitesses moyennes .....	53
4.3.8	Temps passé dans chaque secteur .....	54
4.4	Résultat des modèles de prédiction .....	56
4.4.1	Régressions multiples.....	56
4.4.2	Réseaux de neurones .....	58
4.4.3	Arbre de classification :.....	60
CHAPITRE 5	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	67
BIBLIOGRAPHIE	.....	69
ANNEXES	.....	73

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Politiques et techniques d'épandage de quelques villes canadiennes .....	6
Tableau 2.2 : Politiques de déblaiement de quelques villes canadiennes .....	7
Tableau 2.3 : Politiques de chargement et d'élimination de quelques villes canadiennes.....	8
Tableau 2.4 : Utilisation du SIG et GPS dans les opérations de déneigements .....	10
Tableau 4.1 : Mesures de performance par secteur (données du 11 mars 2014) .....	38
Tableau 4.2 : Indicateurs de performance associés aux segments de rue (données du 11 mars 2014) .....	39
Tableau 4.3 : Tableau de p-value des facteurs de modèle de regression multiple .....	57
Tableau 4.4 : Les résultats obtenus avec les réseaux neurones .....	59

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Système de télémétrie .....	2
Figure 3.1 : Exemple de trace récoltée .....	18
Figure 3.2 : Exemple de cas d'imprécision de la trace GPS .....	20
Figure 3.3 : Création de zones tampons autour des lignes centrales de rue .....	21
Figure 3.4 : Structure des neurones (Agard, 2015) .....	35
Figure 4.1 : Présentation cartographique de la quantité de matériel épandue .....	40
Figure 4.2 : Présentation de la quantité de matériel épandue en fonction de la longueur d'un segment de rue (kg/km) .....	41
Figure 4.3 : Présentation cartographique du temps total de tous les camions passé dans un segment de rue (en s) .....	42
Figure 4.4 : Présentation cartographique des vitesses moyennes d'épandage (en km/h) .....	43
Figure 4.5 : Présentation cartographique des vitesses moyennes (en km/h) .....	44
Figure 4.6 : Présentation cartographique de la consommation moyenne (en l/h) .....	45
Figure 4.7 : Présentation cartographique du temps d'épandage calculé à partir des vitesses moyennes (en s) .....	46
Figure 4.8 : Présentation cartographique du nombre de passage des camions .....	47
Figure 4.9 : Présentation cartographique de la quantité des matériels d'épandage (en kg) .....	48
Figure 4.10 : Présentation cartographique de la quantité des matériels normalisée (en kg/km) ....	49
Figure 4.11 : Présentation cartographique de la consommation moyenne (en l/h) .....	50
Figure 4.12 : Présentation cartographique du taux de service .....	51
Figure 4.13 : Présentation cartographique de l'efficacité des tournées .....	52
Figure 4.14 : Présentation cartographique du taux d'épandage .....	53
Figure 4.15 : Présentation cartographique du temps total d'épandage (théorique) .....	54
Figure 4.16 : Présentation cartographique de temps passé par secteur pour tous les camions .....	55

Figure 4.17 : Valeurs observées en fonction des valeurs prédites .....	58
Figure 4.18 : Valeurs observées en fonction des valeurs prédites (réseaux de neurone) .....	59
Figure 4.19 : Histogramme de la quantité de sel avec 4 catégories .....	60
Figure 4.20 : Taux d'erreur de la classification pour 4 catégories .....	61
Figure 4.21 : Importance des facteurs dans le modèle .....	61
Figure 4.22 : Matrice de classification avec 4 catégories .....	62
Figure 4.23 : Arbre de classification avec 4 catégories .....	63
Figure 4.24 : Histogramme de la quantité de sel avec 3 catégories .....	64
Figure 4.25 : Taux d'erreur de la classification pour 3 catégories .....	64
Figure 4.26 : Matrice de classification avec 3 catégories .....	65
Figure 4.27 : Importance des facteurs dans le modèle .....	65
Figure 4.28 : Arbre de classification avec 3 catégories .....	66

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

GPS	Global Positioning System
SIG	Système d'Information Géographique

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A : STRUCTURE DE L'ARBRE À 4 CATÉGORIES .....	73
ANNEXE B : STRUCTURE DE L'ARBRE À 3 CATÉGORIES .....	74



## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Dans les régions nordiques, une des composantes les plus importantes de l'entretien hivernal des réseaux routiers consiste à épandre des fondants (sel) et des abrasifs sur la chaussée. Cette opération, faite à l'aide de camions spécialement équipés, est extrêmement coûteuse pour les gouvernements et les municipalités. Le département de transport de Michigan a dépensé 103 millions de dollars pour l'exercice 2013 (Slone, 2014), en Ontario les dépenses totales des opérations de déneigements ont dépassé 170 millions de dollars pour l'exercice 2013 (Ontario, 2015). Aussi en 2013, le ministère des Transports au New Jersey a dépensé un record de 138 millions de dollars (Slone, 2014). Le Ministère québécois des Affaires municipales a déclaré que les dépenses en 2013 ont dépassé 785 millions de dollars pour les villes québécoises.

Devant cette énorme dépense, les municipalités ont tendance à utiliser des technologies afin de réduire les coûts liés aux opérations de déneigements, tels que les systèmes d'information météorologique routière et les systèmes de localisation automatisée des véhicules servant au suivi des opérations et des performances (Fu, Trudel, & Kim, 2009). Parmi ces technologies, on trouve les technologies de télémétrie qui sont de moins en moins coûteuses et qui deviennent indispensables dans la gestion de flotte de véhicule. Ces technologies collectent en temps réel d'énormes quantités de données qu'il faut tenter d'exploiter au maximum afin de permettre une meilleure utilisation des ressources et leur optimisation (maintenance, usage, service aux citoyens, carburant, etc.).

La figure 1.1 illustre le fonctionnement de cette technologie.

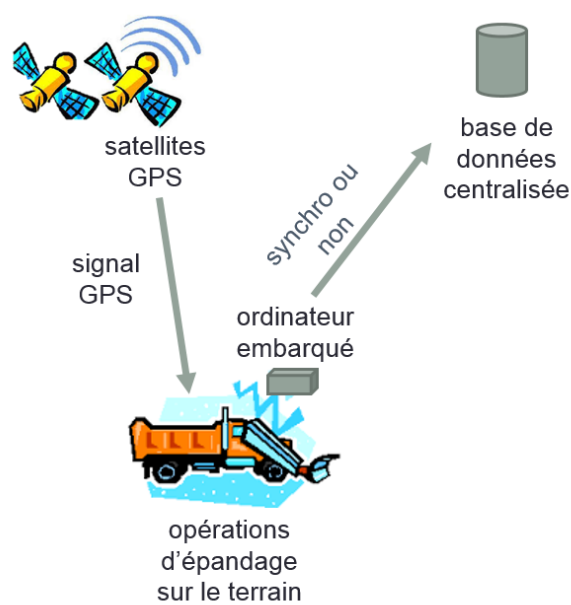


Figure 1.1: Système de télémétrie

Le système embarqué capte les signaux de GPS ainsi que plusieurs données sur l'utilisation du véhicule et des dispositifs de déneigement, puis les envoie à une base de données centralisée (Figure 1.1). Cette transmission se fait, soit en temps réel en utilisant un système cellulaire, soit à la fin de la journée en téléchargeant toutes les données.

Notre projet de recherche a été réalisé en partenariat avec la ville de Granby (90 000 habitants), qui dépense environ 3 millions de dollars annuellement (ville de Granby, 2015) pour les opérations de déneigements. La ville est très proactive dans le domaine du déneigement. Elle a équipé ses 11 véhicules d'épandage de capteurs embarqués, ainsi que certains véhicules de déblaiement et plusieurs camions de ses fournisseurs de services (contracteurs). Cependant, la ville n'exploite pas totalement les données de télémétrie. En effet, suite à une rencontre avec les responsables de la ville en février 2015, il a été établi qu'ils utilisent les données pour :

- obtenir les quantités totales de sel et de sable épandues;
- localiser les camions d'épandage en temps réel;
- vérifier si les contracteurs ont quitté les entrepôts;
- vérifier grosso modo si les secteurs sont équilibrés en terme de charge de travail et si les entrepreneurs réalisent leur travail;

- vérifier la véracité des plaintes des citoyens;
- faire le suivi des camions de déblaiement.

Pour ce projet de recherche, notre mission est d'explorer les potentialités d'exploitation des données récoltées. Il s'agit de traiter et d'analyser les données de télémétrie de 11 camions d'épandage de la ville et de développer des indicateurs de performance sur les opérations d'épandage du réseau routier. Ensuite développer des modèles pour prédire la quantité des fondants et d'abrasifs en fonction des conditions climatiques et d'autres paramètres touchant les opérations effectuées. Les défis sont multiples, puisque les données de télémétrie récoltées ne se présentent pas nécessairement sous un format qui en permet un traitement direct pour obtenir les indicateurs.

Dans la première phase de ce projet de recherche, nous proposons une méthodologie d'obtention d'indicateurs de performance pertinents sur les secteurs et les segments de rues ayant plus de précision et de détails que les indicateurs déjà utilisés dans la littérature, et répondant à la fois aux besoins des responsables et des chercheurs dans le domaine de l'optimisation : quantité épandue, vitesse de pose, consommation de carburant, taux de pose, etc. Cela suppose que nous allons également développer des méthodes spécifiques de traitement des données GPS récoltées. Nous proposons également une méthode pour estimer le nombre de passages de véhicules sur chaque segment de rue, qui va être utilisé pour déterminer l'efficacité des tournées.

Dans la deuxième phase, nous développons des modèles de prédiction qui vont estimer la quantité des abrasifs et des fondants pour chaque segment de rue en utilisant des données météorologiques, des indicateurs développés dans la première phase et des informations liées aux segments.

Le présent mémoire débute par une revue de littérature touchant différents aspects liés aux opérations de déneigement, aux indicateurs de performance et aux modèles de prédiction utilisés dans le domaine du déneigement. Ensuite, le troisième chapitre commence par une description de la méthodologie utilisée dans ce projet de recherche. Il présente ensuite les différents indicateurs développés pour le projet, partitionnés en deux parties : des indicateurs pour les segments de rues et des indicateurs pour les secteurs. La fin du chapitre introduit les données utilisées pour les modèles de prédiction.

Le quatrième chapitre présente les résultats sur les indicateurs de performance développés au chapitre précédent, pour une journée typique d'opérations à la ville de Granby. Appuyés par des tableaux et des cartes, la première partie est dédiée aux segments de rue alors que la deuxième est dédiée aux secteurs. La présentation visuelle permet une vision concrète des indicateurs de performance. À la fin du chapitre, nous présentons trois modèles de prédiction pour estimer la quantité de fondants et d'abrasifs pour chaque segment de rue.

Le mémoire se clôt sur la conclusion qui revient sur les principales contributions et énonce quelques perspectives de recherche.

## **CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE**

Ce chapitre introduit une revue de littérature touchant différents aspects liés aux opérations de déneigements, aux indicateurs de performance et aux modèles de prédiction utilisés dans le domaine du déneigement.

### **2.1 Les opérations de déneigement**

Les opérations de déneigement se décomposent essentiellement en trois activités principales : l'épandage de fondants et d'abrasifs (matériaux d'épandage), le déblaiement (tassement) et le chargement de la neige.

#### **2.1.1 L'épandage**

L'épandage consiste à déposer des fondants et des abrasifs sur les rues et les trottoirs. Les fondants sont appliqués pour faire fondre la neige, pour empêcher la formation de plaques solides de glace et aussi pour éviter la formation de verglas. Le sel (chlorure de calcium) reste parmi les fondants les plus utilisés par les villes parce qu'il est moins cher et très soluble dans l'eau. Cependant, le sel peut causer des impacts environnementaux aux terrains riverains des rues et à la nappe phréatique. Les abrasifs sont utilisés essentiellement pour améliorer la traction lors des températures très froide (moins de  $-10^{\circ}\text{C}$ ) et pour éviter les problèmes environnements causés par les fondants (Perrier, Langevin, & Campbell, 2006). Les politiques et les techniques d'épandage diffèrent d'une municipalité à l'autre. À titre d'exemple, le tableau 2.1 présente les normes de différentes municipalités canadiennes (Nassiri, Bayat, & Salimi, 2015).

Tableau 2.1: Politiques et techniques d'épandage de quelques villes canadiennes

Ville	Politique d'épandage	Quantité totale de sable utilisée (tonnes)	Quantité totale de sel utilisée (tonnes)
Edmonton (Edmonton , 2009)	sable et 25% sel si $-1^{\circ}\text{C} < T_{\text{air}} < 5^{\circ}\text{C}$ sable et 12% sel si $-12^{\circ}\text{C} < T_{\text{air}} < -6^{\circ}\text{C}$ sable et 6% sel si $-18^{\circ}\text{C} < T_{\text{air}} < -13^{\circ}\text{C}$ pas de sel si $T_{\text{air}} < -18^{\circ}\text{C}$	152 505 (2008–2009)	23 495 (2008–2009)
Calgary, (Calgary, 2009)	Appliquer le mélange sable-sel dans le cas d'une chute de neige de moins de 5 cm sel: $-5^{\circ}\text{C} < T_{\text{surface}} < 0$ sable avec 4% sel: $T_{\text{surface}} < -5^{\circ}\text{C}$	60 000 (2012)	
Ottawa (Ottawa, Salt and Sand, 2013)	Appliquer sel sec, sel humide, mélange de sel et sable 50/50 , chlorure de sodium, chlorure de calcium, et abrasif	Pas disponible	140 000 (moyenne annuelle)
Toronto, (Toronto, 2004)	Appliquer 100% de sel aux autoroutes pour 2-3 cm de neige et 1-2 h continue de neige. Appliquer 100% sel gemme aux artères lorsque 5 cm de neige et 2-3 h continue de neige	Pas appliqué	147 100 (2004–2005)
Montréal, (Montréal, 2013)	Appliquer le sel et le gravier ou le sable (abrasifs) sur les routes et les trottoirs selon les conditions météorologiques	Pas disponible	137 000 avec certains abrasifs (moyenne annuelle)
Granby	Appliquer le sel et le sable 3 h après les précipitations ou déblaiement	179 000 (2013-2014)	303 000 (2013-2014)

## 2.1.2 Le déblaiement

Le déblaiement (aussi appelé tassement) est l'opération qui consiste à dégager la neige des routes en repoussant la neige en bordure des routes avant ou après les opérations d'épandage, selon la quantité de neige au sol. Les rues de services urgents, les autoroutes, les lignes de bus et les artères sont habituellement jugées prioritaires par les municipalités. Cependant, la politique de déblaiement est différente d'une municipalité à l'autre; le tableau suivant en présente une liste (Nassiri et al., 2015):

Tableau 2.2: Politiques de déblaiement de quelques villes canadiennes

Ville	Rues prioritaires	Opérations de déblaiement (tassement) et délai de retour au pavé sec
Edmonton (Edmonton, City of Edmonton, 2013)	Les artères et les lignes de bus	Commencer lorsque 3 cm de neige se sont accumulés. Dans les 36 h après la fin des chutes de neige.
Calgary, (Calgary, 2009)	Région d'affaire centrale et artère	Commencer lorsque 5 cm de neige se sont accumulés ou lorsque il y a de la poudrerie. Dans les 24 h après la fin des chutes de neige.
Ottawa (Ottawa, 2013)	Artères et routes collectrices (routes régionales et les rues de la ville avec les lignes de bus)	Commencer lorsque 2,5 cm de neige se sont accumulés. Dans les 2 h après la fin des chutes de neige.
Toronto, (Toronto, Infrastructure Toronto, 2013)	Autoroutes	Commencer lorsque de 2,5 à 5 cm de neige se sont accumulés. Dans les 2-3 h après la fin des chutes de neige.

Tableau 2.3: Politiques de déblaiement de quelques villes canadiennes (suite et fin)

Montréal, (Montréal, 2013)	Transport en commun réseau et itinéraires pour les hôpitaux, les écoles et les services d'urgence	Commencer lorsque 2,5 cm de neige se sont accumulés et continuer jusqu'à ce que la tempête se termine.  Dans les 8 h après la fin des chutes de neige.
Granby	Classés par niveau : <ul style="list-style-type: none"><li>• Niveau 1 : artères</li><li>• Niveau 2 : collectrices</li></ul> Niveau 3 : rues locales	Commencer lorsque 5 cm de neige sont accumulés.

### 2.1.3 Le chargement et l'élimination

La phase de chargement et d'élimination consiste à ramasser les quantités de neige accumulées sur les bords des rues dans des camions pour les transporter vers les sites d'élimination. Cette opération est le plus souvent réalisée après les tempêtes de neige, mais parfois elle peut s'effectuer durant la tempête pour ramasser la neige dans des ruelles étroites et d'autres zones où il n'y a pas d'espace pour le stockage de la neige (Perrier et al., 2006). Le tableau suivant présente une liste de différentes politiques de chargement et d'élimination (Nassiri et al., 2015).

Tableau 2.4: Politiques de chargement et d'élimination de quelques villes canadiennes

Ville	Politique de chargement et d'élimination
Edmonton	Les andains de neige sont retirés des routes artérielles et des lignes de bus et transportés à l'un des quatre sites de stockage à Edmonton.
Calgary	Information non disponible.



Tableau 2.5: Politiques de chargement et d'élimination de quelques villes canadiennes (suite et fin)

Ottawa	Les andains de neige sont éliminés ou diminués quand ils commencent à restreindre la visibilité des conducteurs et la largeur des rues.
Toronto	Une fois que les routes principales ont été déblayées, les équipes commencent à enlever la neige des arrêts d'autobus et des passages pour piétons.
Montréal	Suite à l'accumulation de plus de 10 cm de neige, les autorités peuvent décider de retirer la neige des rues pour l'envoyer dans des sites de dépôt ou d'élimination. Cette opération, qui nécessite plus de 1500 pièces d'équipements, dure de 3 à 5 jours.
Granby	La neige est habituellement laissée à l'accumulation dans la plupart des rues, sauf sur les rues commerciales et les rues étroites, où elle est ramassée. La neige en bordure de rue peut être soufflée sur les terrains privés.

## 2.2 Les systèmes d'information géographique

Dans cette partie, nous traitons des systèmes d'information géographique, qui est l'un des outils utilisés dans le cadre de ce projet.

### 2.2.1 Définition

Les systèmes d'information géographique (SIG) servent à stocker, extraire, manipuler, analyser et cartographier des données géographiques. Ils sont capables de transformer facilement un système de référencement (par exemple *Universal Transverse Mercator* (UTM)) à un autre système de référencement). Les SIG permettent ainsi la représentation visuelle abstraite des phénomènes géographiques sur les cartes. On peut citer plusieurs applications de SIG (Trépanier, 2015) :

- La cartographie automatique (*Automated Mapping*) : on crée des cartes numérisées à partir de photos ou de cartes existantes.

- La cartographie thématique (*Thematic Mapping*): on monte des représentations de statistiques à l'aide de couleurs, de graphes superposés, de symboles ou d'étiquettes.
- La fabrication de cartes (*Map Modelling*): on utilise le SIG pour fabriquer de toutes pièces des cartes touristiques, topométriques, routières ou autres.
- Les statistiques spatiales (*Spatial Statistics*): on mesure des distances, agrège des données par secteur, calcule des moyennes par couloir, etc.
- Les analyses spatiales (*Spatial Analysis*): on se sert des caractéristiques spatiales dans l'analyse: corrélations spatiales, analyses de proximité, gravité, etc.
- La visualisation spatiale (*Spatial Browsing*): on affiche des éléments à références spatiales précis: routes, lignes TC, parcours, itinéraires, etc.
- L'application de logiques spatiales (*Spatial Reasoning*): on utilise la désagrégation artificielle, le regroupement par thème, le calcul d'itinéraires, etc.

### 2.2.2 L'utilisation de SIG dans les opérations de déneigement

Souvent, l'utilisation d'un SIG est accompagnée de l'utilisation d'un GPS qui sert à localiser les camions de déneigements. Les coordonnées collectées à partir du GPS seront traitées par le SIG, qui a pour rôle de faciliter la gestion et l'analyse des données spatiales et non spatiales. Dans la littérature, l'utilisation de GPS et de SIG est citée régulièrement dans le domaine du déneigement, surtout dans la conception des tournées de véhicule ou tout simplement pour le suivi des opérations de déneigements. Le tableau 2.4 présente une liste de travaux pertinents.

Tableau 2.6: Utilisation du SIG et GPS dans les opérations de déneigements

Application	Auteur
Conception d'un système, CASPER (Computer Aided System for Planning Efficient Routes), qui combine un SIG aux techniques de recherche opérationnelle pour concevoir des tournées de déneigement.	(Wang & Wright, 1994)

Tableau 2.6: Utilisation du SIG et GPS dans les opérations de déneigements (suite et fin)

Développement d'un outil en utilisant une heuristique basée sur les données d'un SIG pour optimiser les opérations de déneigement.	(Li & Eglese, 1996)
Dans le but d'assurer un meilleur suivi des opérations en cours, des travaux relatant l'installation de GPS sur une flotte de 80 véhicules et le traitement des données utilisant des techniques d'intelligence artificielle.	(Roosevelt, Hanson, & Campenni, 2001)
Développement d'un système qui crée des tournées affichées dans un SIG en combinant la recherche opérationnelle et un système de prévision à haute résolution qui prévoit la température et l'état de surface de la route à travers le réseau routier sur une période de 24 heures.	(Handa, Chapman, & Yao, 2005)
Implantation d'un système web d'aide à la décision pour l'entretien hivernal WMDSS ( <i>Web-based Winter Maintenance Decision Support System</i> ) qui améliore la capacité des responsables à évaluer les différentes procédures dans la gestion de déneigement d'une manière optimale.	(Sugumaran, Salim, Strauss, & Fulcher, 2005)
Développement d'un SIG qui utilise des techniques de recherche en intelligence artificielle pour créer des tournées de déneigement dans le but de simplifier la création de tournées en utilisant le moins d'information possible.	(Rao, Mitra, & Zollweg, 2011)
Développement d'un outil et d'une méthodologie qui permet à l'utilisateur final d'effectuer de l'optimisation logistique dans le domaine du déneigement des routes. L'outil intègre la gestion des SIG et du GPS, avec un ensemble d'outils pour la planification, l'analyse et l'optimisation des itinéraires.	(Straek, 2013)

## 2.3 Les indicateurs de performances

### 2.3.1 Définition

De manière générale, les indicateurs de performances mesurent l'efficacité et l'efficience avec lesquelles les objectifs et la satisfaction des clients ont été atteints (Neely, Gregory, & Platts, 2005). Ils permettent aux décideurs d'améliorer les décisions d'affectation des ressources et de suivre l'évolution des objectifs au fil du temps (Pickrell & Neumann, 2001).

### 2.3.2 Les indicateurs de performance liés au déneigement

L'utilisation des indicateurs de performance dans le domaine du déneigement est courante. (Adams, Danijarsa, Martinelli, Stanuch, & Vonderohe, 2003) ont développé différents indicateurs de performance pour l'entretien hivernal, classés en 3 catégories selon le domaine d'application : la gestion des opérations hivernales au niveau national, la budgétisation et la prévision des besoins en équipement, la gestion des opérations hivernales au niveau du comté. Parmi ces indicateurs de performance, on en trouve liés aux stock et aux taux d'application des matériaux d'épandage, à la température de la chaussée suivant l'heure, aux coûts des équipements et aux opérations des équipements.

#### Mesures sur les taux d'application du matériel :

Ce taux d'application du matériel est calculé de la manière suivante :

$$\overline{MAR}_{salt,h,p} = \left( \sum_{y=1}^{Y_{salt,h,p}} MAR_{salt,y,h,p} \right) / 2Y_{salt,h,p}$$

$$\overline{MAR}_{sand,o,e} = \left( \sum_{y=1}^{Y_{salt,o,e}} MAR_{salt,y,o,e} \right) / 2Y_{salt,o,e}$$

Où :

$\overline{MAR}_{salt,h,p}$  = taux moyen d'application horaire pour chaque section de patrouille

$\overline{MAR}_{sand,o,e}$  = taux moyen d'application pour chaque opérateur et événement

$MAR_{salt,h,p}$  = quantité de sel (Kg) durant l'heure h et la patrouille p

$MAR_{sand,o,e}$  = quantité de sable (Kg) pour l'événement  $e$  et l'opérateur  $o$

$Y_{salt,h,p}$  = nombre total d'enregistrements durant l'heure  $h$  et patrouille  $p$

$Y_{salt,o,e}$  = nombre total d'enregistrements pour l'événement  $e$  et l'opérateur  $o$

### Mesures de l'inventaire de matériel :

La quantité de matériel utilisé pour chaque événement et chaque section de patrouille, est calculée en multipliant le taux d'application moyenne par le nombre de voies traitées :

$$Q_{salt,p,e} = \left[ \left( \sum_{y=1}^{Y_{salt,p,e}} MAR_{salt,y,p,e} \right) / 2Y_{salt,p,e} \right] L_{salt,p,e}$$

Où

$L_{salt,p,e}$  = nombre en mille des voies traitées pour l'événement  $e$  et la section  $p$

La quantité de matériel appliquée par chaque section de patrouille est :

$$Q_{salt,p} = \sum_{e=1}^E Q_{salt,p,e}$$

Où

$E$  = nombre total d'événement

### Mesures des opérations des équipements :

Le taux moyen de production calcule la durée des opérations par rapport aux longueurs des voies traitées pour chaque classe de rue et pour chaque unité (camion) :

$$EMR_{u,r} = H_{u,r} / L_{u,r}$$

Pour les unités de déblaiement :

$$H_{u,r} = \sum_{k=1}^{k_{u,r}} (T_{up} - T_{down})_k$$

$T_{up}$  = heure de début du déblaiement

$$T_{down} = \text{heure de fin du déblaiement}$$

Pour les unités d'épandage :

$$H_{u,r} = \sum_{k=1}^{k_{u,r}} (T_{off} - T_{on})_k$$

$$T_{off} = \text{heure de début de l'épandage}$$

$$T_{on} = \text{heure de fin de l'épandage}$$

Pour les unités de chargement :

$$H_{u,r} = \sum_{k=1}^{k_{u,r}} (T_{sort} - T_{entre})_k$$

$$T_{sort} = \text{l'heure quand les camions sortent du garage}$$

$$T_{entre} = \text{l'heure quand les camions entrent au garage}$$

Les heures totales d'opération pour chaque unité :

$$H_u = \sum_{r=1}^R H_{u,r}$$

Les heures totales d'opération pour les unités de déblaiement :

$$ET_u = \sum_{k=1}^{k_u} (T_{up} - T_{down})_k$$

Les unités d'épandage :

$$ET_u = \sum_{k=1}^{k_u} (T_{off} - T_{on})_k$$

Où

$$H_{u,r} = \text{le nombres d'heure pour chaque unité } u \text{ en service dans la classe rue } r$$

$L_{u,r}$  = le nombre de milles d'une rue de classe  $r$  traitée par unité  $u$

$k$  = indice de période pour un équipement en service

$k_u$  = le nombre total des périodes d'unité  $u$  en service

## 2.4 Les modèles de prédiction dans le domaine du déneigement

Un des grands défis de recherche dans le domaine du déneigement est de modéliser le lien fort entre les opérations de déneigement et les conditions météorologiques. Pour connaître exactement la quantité de fondants et d'abrasifs à appliquer, il faut avoir une idée des différents facteurs qui entrent en ligne de compte (précipitations, température d'air, température de surface, humidité, durée de précipitation...). L'un des facteurs les plus difficiles à prédire est la température de surface de la chaussée. (Barber, 1957) développe un modèle pour calculer la température de surface maximale en se basant sur la radiation solaire quotidienne totale. (Rumney & Jimenez, 1971) ont amélioré le modèle de prédiction en utilisant la radiation solaire horaire au lieu de la mesure quotidienne.

(Minhoto, Pais, Pereira, & Picado-Santos, 2005) ont appliqué la méthode des éléments finis à trois dimensions afin de prédire la température de surface basé sur la température de l'air, la vitesse de vent quotidienne, et les valeurs horaires pour le rayonnement solaire. (Diefenderfer, Al-Qadi, & Diefenderfer, 2006) ont développé un modèle de régression linéaire simple pour prédire les températures minimales et maximales de surface basé sur la température de l'air, la radiation quotidienne et la profondeur :

$$T_{p\ max} = 2.78752 + 0.6861T_{a\ max} + 5.6736 \times 10^{-4}R_s - 27.8739P_d$$

$$T_{p\ min} = -1.2097 + 0.6754T_{a\ min} + 3.7642 \times 10^{-4}R_s + 7.2043P_d$$

Où:

$R_s$  = radiation solaire quotidienne en  $Kj/m^2$

$P_d$  = profondeur en  $m$

$T_{a\ max}$  = température maximum d'air en degré celsius

$T_{a\ min}$  = température minimum d'air en degré celsius

(Hosseini, Hossain, Fu, Johnson, & Fei, 2015) présentent une étude de deux ans sur le développement de modèles paramétriques (régression multiples ) et non paramétriques (réseaux de neurone) pour prévoir la température de surface de la chaussée basé sur la température moyenne de l'air et la vitesse moyenne du vent :

$$T = -1.5008 + 0.2140T_a + 0.2646 \times 10^{-4}T_{a2} + 0.7471S + 0.0022W$$

Où

$T_a$  = température d'air en degré celsius

$T_{a2}$  = température d'air de l'heure précédente

$W$  = vitesse de vent en Km/h

$$\begin{cases} S = 1 \text{ si ensoleillé} \\ S = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

Les travaux mentionnés précédemment traitent seulement de la température de surface. Cependant l'objectif ultime est d'estimer la quantité de sel pour assurer une meilleure circulation. Malheureusement, peu de recherches touchent à ce sujet. (Blomqvist, Gustafsson, Eram, & Ünver, 2011) ont développé un modèle qui prédit la quantité minimum de sel en se basant sur le trafic et l'humidité de surface; ce modèle était inspiré des travaux du *Swedish National Road and Transport Research Institute* qui a développé un modèle de prédiction qui estime la quantité minimale de sel pour assurer la bonne circulation routière, basé sur les données du trafic (Blomqvist et al., 2011).



## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre débute par une description des données utilisées et de la méthode de leur traitement. Ensuite, il présente les différents indicateurs de performance développés pour ce projet de recherche, suivi de la description des modèles de prédiction élaborés.

### 3.1 Sources de données

Dans le cadre de ce projet, nous avons examiné des données collectées par les systèmes embarqués dans les camions d'épandage de la ville de Granby, au Québec. Ces données sont enregistrées à chaque instant  $t$  à partir des différents capteurs à bord des camions. Chaque enregistrement renseigne sur la date et l'heure de collecte, la position géographique (longitude, latitude), le taux de pose de fondants et d'abrasifs, ainsi que d'autres indicateurs sur les conditions de marche du véhicule.

Nous avons d'abord obtenu les données touchant la journée du 11 mars 2014, ce qui représente 549 930 enregistrements répartis sur 11 véhicules plus les véhicules des contractants. Ce jour est situé dans un intervalle de précipitations neigeuses (2,5 cm le 10 mars et 19,4 cm le 12 mars). Chaque véhicule est affecté à un secteur défini par la municipalité (Le secteur est établi selon l'appartenance géographique de chaque point contenu dans les traces GPS). Cet ensemble de données est à un très haut niveau de résolution (donnée détaillée à chaque 0,5 seconde) et nous a permis de développer les indicateurs. Il provient directement des équipements embarqués fournis par la compagnie québécoise Isaac Instruments.

Nous avons ensuite obtenu les données de télémétrie d'une période de déneigement complète. Les données touchent la saison 2014-2015 et comportent 29,1 millions d'enregistrements sur 12 véhicules. Ces données ont été extraites de la base de données historique de la ville de Granby. Il s'agit donc de données post-traitées par Isaac Instruments, à un bon niveau de résolution spatial et temporel (à chaque 0,5 seconde), mais avec moins de précision sur les données véhiculaires.

Pour ces deux ensembles, chaque enregistrement est cartographié sur le territoire de la municipalité à l'aide de ses coordonnées géographiques en utilisant le système d'information géographique *Quantum GIS* (logiciel QGIS, <http://www.qgis.org>). Les données sont récoltées selon une fréquence constante de 120 lectures par minute (à chaque 0,5 seconde), ce qui facilite

le calcul des vitesses moyennes et nous donne une idée sur le temps passé sur un segment de rue (Figure 3.1) les chiffres représentent le temps accumulés par le camion.

Pour le moment, la municipalité utilise ces données à deux fins principales : 1) vérifier visuellement, via une interface cartographique, si toutes les rues ont été couvertes par les opérations et 2) déterminer les quantités totales de fondants et d'abrasifs utilisés dans les opérations. Dans le premier cas, le répartiteur examine la carte de visu et regarde si les rues semblent couvertes, sans avoir de validation exogène de ses observations. De plus, l'historique peut servir de temps en temps à valider la présence des équipements dans les rues en cas de plainte des citoyens, par exemple.

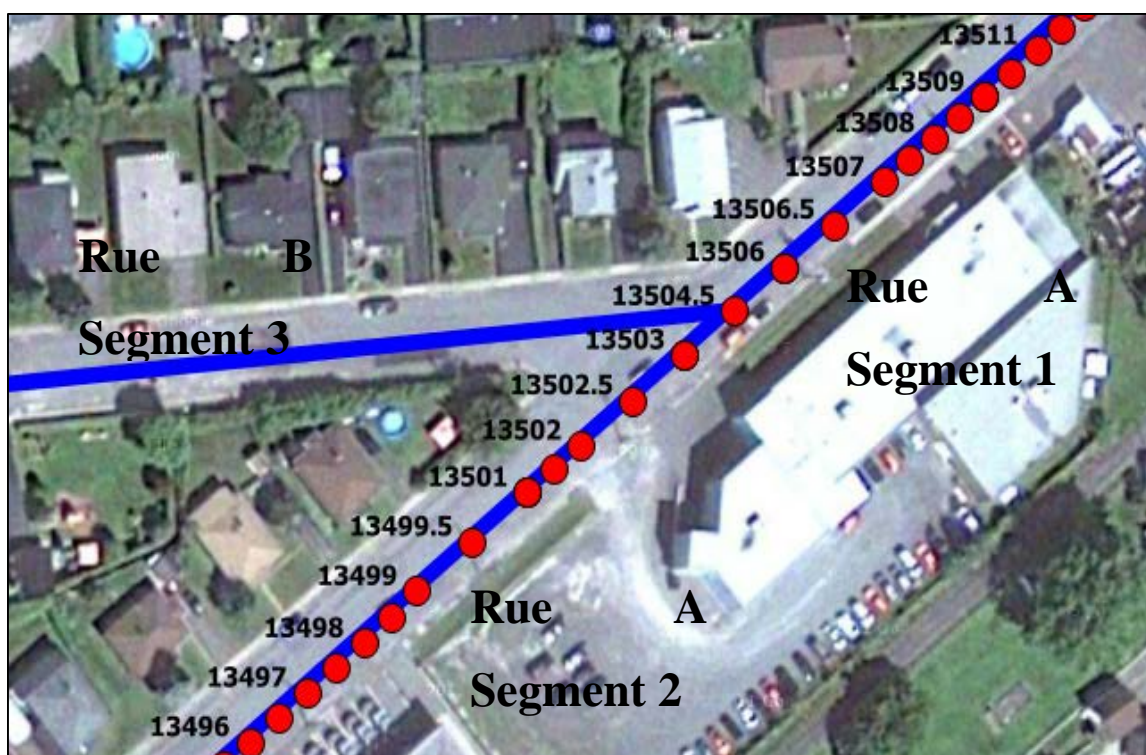


Figure 3.1: Exemple de trace récoltée

### 3.2 Méthode de traitement

Dans cette section, nous présentons les étapes de traitement de données réalisées afin de pouvoir calculer les indicateurs.

### **3.2.1 Utilisation d'un SIG**

Le système d'information géographique nous permet de visualiser les traces des données de télémétrie sur la carte de la ville de Granby, ce qui donne une idée générale sur le parcours des véhicules. De plus, le SIG est utilisé pour assigner les données de télémétrie au réseau routier et au secteur de la ville correspondant. Plus précisément, le SIG permet de rattacher chaque enregistrement à un segment de rue grâce à sa localisation.

### **3.2.2 Précision des lectures GPS**

La localisation GPS est utilisée dans plusieurs domaines : les systèmes de transport intelligents, les systèmes de navigation, les systèmes anticollisions. Cependant, l'imprécision relative du GPS empêche quelquefois le bon fonctionnement de telles applications (Drawil, Amar, Basir, & Ieee, 2011). Cette imprécision est due à plusieurs éléments: l'estimation de l'heure donnée par l'horloge du satellite, l'estimation des éphémérides, les erreurs dans les cartes ionosphériques, le bruit de mesure du récepteur, les multi-trajets des signaux GPS, l'erreur dans le modèle troposphérique et l'erreur dans le modèle ionosphérique (Weiss, Petit, Jiang, & Ieee, 2005).

Dans ce projet, la localisation enregistrée peut s'écarter de quelques mètres de la localisation réelle, ce qui peut engendrer de petits écarts dans le calcul des indicateurs. À la figure 3.2, nous voyons que les traces enregistrées sur la rue qui va de gauche à droite sont légèrement décalées vers le haut de la carte. L'œil humain s'aperçoit de cet écart, mais la correction des données ne peut être faite directement; il faut alors utiliser une méthode d'appariement au réseau routier.



Figure 3.2: Exemple de cas d'imprécision de la trace GPS

### 3.2.3 Appariement au réseau routier

Dans les SIG, la représentation des réseaux routiers est effectuée en transformant chaque segment du réseau routier réel en une ligne (ligne centrale de rue) à partir de prises de vues aériennes (Hong & Vonderohe, 2011). Parce que cette abstraction ne peut représenter efficacement la largeur réelle des rues, cette transformation peut entraîner la perte de segments, des erreurs d'alignement, le mauvais positionnement d'intersections, ou la représentation erronée des virages (Hallmark, Schuman et al. 2003)

Pour remédier à ce problème, on a créé dans le logiciel QGIS une zone tampon (*buffer*) qui englobe tous les points qui se trouvent à 5 mètres de chaque côté de la ligne centrale de la rue (figure 3.3). Il faut éviter d'utiliser un tampon trop large afin de ne pas capter de points qui "appartiendraient" à une autre rue. La figure 3.3 présente un exemple de superposition. Certains points se retrouvent dans deux zones tampons. Le point est alors assigné au segment le plus près.

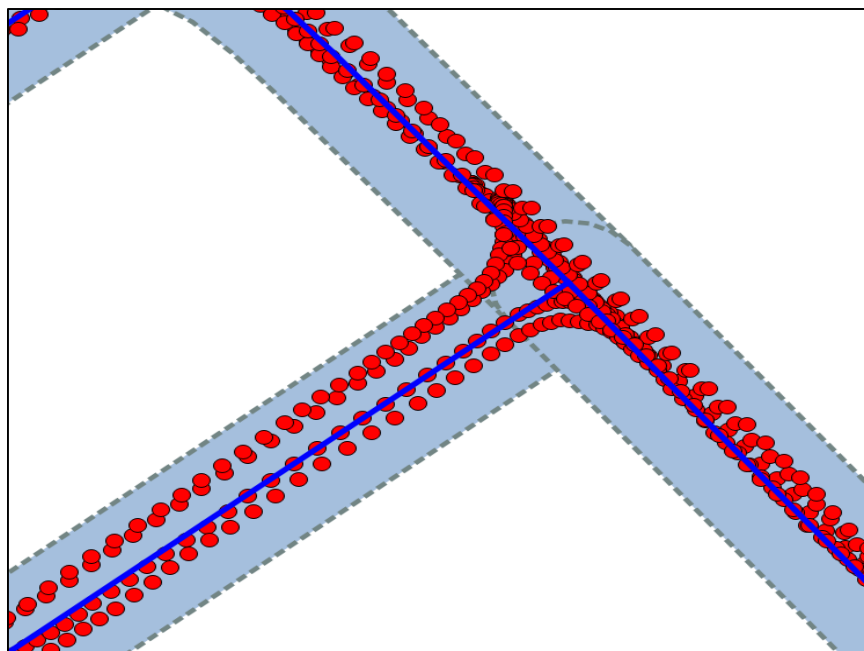


Figure 3.3: Création de zones tampons autour des lignes centrales de rue

### 3.2.4 Traitement des données

Après avoir assigné tous les points de la trace aux segments routiers correspondants, la deuxième phase consiste à se débarrasser des erreurs ou de toutes informations erronées. Pour le deuxième jeu de données (une année complète), nous avons utilisé le logiciel R ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)) parce qu'il peut traiter d'énormes quantités de données. Pour le premier jeu, le tableau Excel a été utilisé.

Plusieurs méthodes peuvent être appliquées pour détecter les valeurs extrêmes des différents indicateurs. Pour le traitement, nous avons utilisé la boîte à moustache de (Tukey and Tukey 1988). Notre règle de décision est de qualifier comme extrême toute valeur qui s'éloigne fortement de l'extérieur des frontières supérieures de la boîte à moustache qu'est défini par  $Q3 + 1.5(Q3 - Q1)$  avec  $Q1$  et  $Q3$  respectivement le premier et le troisième quartile de la population.  $Q3 - Q1$  représente l'écart interquartile et correspond à 50% des observations situées dans la partie centrale de la population. La valeur de 1.5 n'est qu'un compromis pour détecter suffisamment les valeurs extrême dans la distribution. Cela permet d'identifier et d'éliminer des données aberrantes comme par exemple des quantités de pose qui dépassent 50 kg pour un seul enregistrement, des vitesses qui dépassent 140 km/h, etc.

### 3.3 Indicateurs de performance

#### 3.3.1 Indicateurs de performance par segment de rue

Cette partie présente les indicateurs développés pour les segments de rue ainsi que la façon dont ils sont calculés. Nous proposons également une méthode mathématique qui estime le nombre de passages par segment de rue, défini ici comme étant un tronçon de rue situé entre deux intersections.

Les indicateurs développés dans cette partie vont aussi servir à calculer les indicateurs de secteurs.

##### 3.3.1.1 Quantités épandues

Cet indicateur représente la quantité de matériel d'épandage (en kg) pour chaque segment de rue.

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n_i} Q_j \quad (1)$$

Où :

$n_i$  = nombre de points assignés au segment de rue  $i$

$Q_j$  = quantité du matériel d'épandage au point  $j$

Il faut mentionner que la quantité calculée correspond à un seul type de matériel d'épandage (sel, sable, mixte A, mixte B...). L'importance de cet indicateur réside dans le fait qu'il nous donne une idée claire sur les segments de rues nécessitant de grandes quantités. Cependant, cette quantité dépend fortement de la longueur des segments de rue d'où la nécessité de créer un indicateur normalisé.

##### 3.3.1.2 Quantités normalisées

Cet indicateur permet de déterminer la quantité de matériel d'épandage par unité de longueur d'un segment de rue (exprimé en kg/km).

$$Q_{\text{normalisé},i} = \frac{Q_i}{D_i} \quad (2)$$

Où :

$Q_i$  = la quantité de matériel d'épandage pour chaque rue

$D_i$  = la longueur du segment de rue  $i$

La normalisation des quantités de matériel d'épandage par rapport à la longueur des rues nous donne une idée plus claire et juste sur les quantités de matériel d'épandage utilisées.

### 3.3.1.3 Temps total passé

Cet indicateur compile le temps total passé par tous les camions sur un segment de rue. En fait, il s'agit du nombre total des points assignés à un segment divisé par 2 (puisque chaque point représente une demi-seconde).

$$T_i = \frac{ni}{2} \text{ secondes} = \sum_{j=1}^n \frac{x_{i,j}}{2} \text{ secondes} \quad (3)$$

Où :

$ni$  = le nombre total de points assignés au segment  $i$

$x_{i,j} = 1$  si le point  $j$  est assigné au segment  $i$

$n$  = le nombre total de points

Le temps total passé dépend essentiellement de la vitesse des camions, des arrêts mais aussi du nombre de passage des différents camions. Cet indicateur nous permettra de calculer d'autres indicateurs de ce projet.

### 3.3.1.4 Vitesse moyenne d'épandage

Cet indicateur concerne la vitesse moyenne des camions durant l'opération d'épandage pour chaque segment de rue, ici on fait la somme sur les points d'épandage, contrairement à l'indicateur suivant où il s'agit de tous les points.

$$\overline{V}_{e_i} = \sum_{e=1}^{nei} \frac{V_e}{nei} \quad (4)$$

Où :

$nei$  = nombre total des points  $e$  assignés au segment de rue  $i \forall q_{i,e} > 0$

$q_{i,e}$  = la quantité de matériel d'épandage du point  $e$  assigné au segment de rue  $i$

$V_e$  = vitesse au point  $e$  en km/h

Le calcul de la vitesse moyenne d'épandage est utile à l'optimisation des opérations de déneigement. En effet, elle permet de déterminer le temps de passage sur les liens dans un réseau analytique. Par contre, il ne faut pas confondre la vitesse moyenne d'épandage avec la vitesse moyenne des camions.

### 3.3.1.5 Vitesse moyenne

Cet indicateur représente la vitesse moyenne des camions pour chaque segment de rue, en mode épandage ou non.

$$\bar{V}_i = \sum_{j=1}^{ni} \frac{V_j}{ni} \quad (5)$$

Où :

$V_j$  = vitesse au point  $j$

$ni$  = nombre de points assignés au segment de rue  $i$

Comme la vitesse moyenne d'épandage, la vitesse moyenne peut être utilisée dans la confection des tournées de véhicules. Ainsi, sur les liens où il n'y a pas d'épandage, cette vitesse correspond à la vitesse normale de parcours.

### 3.3.1.6 Consommation moyenne

La consommation moyenne de carburant des camions (en litre/heure) peut être déterminée pour chaque segment de rue.

$$\bar{C}_i = \sum_{j=1}^{ni} \frac{C_j}{ni} \quad (6)$$



Où :

$C_j$  = consommation au point  $j$

$n_i$  = nombre de points assignés au segment de rue  $i$

Cet indicateur permet d'introduire la notion du coût dans chaque segment de rue qui peut aussi servir dans la confection des tournées de véhicules.

### 3.3.1.7 Temps d'épandage basé sur la vitesse moyenne

Cet indicateur compile le temps passé sur chaque segment de rue durant l'opération d'épandage. Il est basé sur la vitesse moyenne d'épandage.

$$Te_i = \frac{nv_i \cdot D_i}{\overline{Ve_i}} \quad (7)$$

Où :

$\overline{Ve_i}$  = vitesse moyenne d'épandage à la rue  $i$

$D_i$  = la longueur de la rue  $i$

$nv_i$  = nombre de voies de la rue  $i$

Le temps d'épandage exact est difficile à calculer en utilisant les points de GPS parce qu'on ne sait pas exactement si le camion est dans une opération d'épandage. L'utilisation de la vitesse moyenne d'épandage permet une estimation du temps d'épandage sous l'hypothèse qu'il n'y a qu'une seule opération par journée.

### 3.3.2 Nombre de passages

Cet indicateur sert à représenter le nombre de passages pour tous les camions pour chaque segment de rue (par exemple, un aller-retour compte pour deux passages). Pour le calculer, nous utilisons la vitesse moyenne.

$$nbp_i = \frac{\overline{V_i} \cdot T_i}{D_i} \quad (8)$$

Démonstration à partir de la vitesse moyenne:

$$\bar{V}_i = \sum_{j=1}^{ni} \frac{V_j}{ni} = \frac{\sum_{k=0}^{nbp_i} \sum_{m=0}^{Mk} V_{i,m,k}}{ni} \quad (9)$$

Où :

$V_j$  = vitesse au point  $j$

$ni$  = nombre de points assignés au segment de rue  $i$

$nbp_i$  = nombre de passages dans la rue  $i$

$Mk$  = nombre total des points dans un passage  $k$

$V_{i,m,k}$  = vitesse au segment de rue  $i$ , passage  $k$ , au point  $m$

$$\sum_{m=0}^{Mk} V_{i,m,k} = \sum_{m=0}^{Mk} \frac{d_{i,m,k}}{t_{i,m,k}} \quad (10)$$

$d_{i,m,k}$  = distance au segment de rue  $i$ , passage  $k$ , au point  $m$

$t_{i,m,k}$  = durée au segment de rue  $i$ , passage  $k$ , au point  $m$

Puisque la durée  $t_{i,m,k}$  est la même pour tous les points  $m$ , on a donc :

$$\sum_{m=0}^{Mk} V_{i,m,k} = \frac{1}{t} \sum_{m=0}^{Mk} d_{i,m,k} \quad (11)$$

Puisque la sommation des distances entre les points dans la rue  $i$  d'un seul passage est la longueur du segment de rue, on obtient :

$$\sum_{m=0}^{Mk} d_{i,m,k} = D_i \quad (12)$$

Ce qui revient à:

$$\bar{V}_i(m/s) = \frac{nbp \cdot D_i}{ni \cdot t} = \frac{nbp \cdot D_i}{T_i} \quad (13)$$

$$T_i = \frac{ni}{2}, t = \frac{1}{2}s$$

La formule mathématique du nombre de passages ne donne pas des résultats en nombre entier. Nous allons corriger ce résultat en utilisant la fonction partie entière du nombre de passages plus un terme  $b$  :

$$nbpcorrigé_i = E(nbp_i + b) \quad (14)$$

Le terme  $b$  est un terme d'erreur que nous proposons de trouver par une méthode basée sur la programmation linéaire mixte, qui vise à trouver le terme  $b$  optimal en minimisant la somme des valeurs absolues des écarts entre nombre de passages réel ( $nbpr_i$ ) et la nouvelle fonction du nombre de passages corrigé ( $nbpcorrigé_i$ )

$$\min \sum_i |nbpr_i - nbpcorrigé_i| \quad (15)$$

Après la linéarisation de la fonction objective, on a :

$$\min \sum_i Z_i \quad (16)$$

Sujet à :

$$Z_i \geq nbpr_i - x_i \quad \forall i \quad (17)$$

$$Z_i \geq x_i - nbpr_i \quad \forall i \quad (18)$$

$$Y_i = nbp_i + b \quad \forall i \quad (19)$$

$$Y_i \geq x_i \quad \forall i \quad (20)$$

$$Y_i \leq x_i + 1 \quad \forall i \quad (21)$$

$$x_i \in \mathbb{N}, b \in \mathbb{R} \quad \forall i \quad (22)$$

La résolution de ce modèle nous donne une valeur de  $b=0,44$ . Par une résolution parallèle par la méthode des moindres carrés, nous obtenons  $b=0,45$ .

Cet indicateur est très important pour les opérations de déneigement en général parce que les statistiques usuelles ne sont pas capables de déterminer le nombre de passage des camions par segment de rue. Cet indicateur sera très utile pour calculer les indicateurs de performance par secteur.

### 3.3.3 Indicateurs de performance par secteur

Outre les indicateurs présentés précédemment pour les segments de rue comme la quantité épandue, la consommation de carburant et le temps accumulé dans chaque secteur, cette partie traite des nouveaux indicateurs qui seront utiles pour les décideurs tels que le taux d'épandage, le taux des opérations d'épandage et l'efficacité des tournées établis par secteur. Le secteur est établi ici selon l'appartenance géographique de chaque point contenu dans les traces GPS, de même que l'appartenance de chaque segment de rue aux secteurs.

Les indicateurs développés dans cette partie vont servir pour : évaluer l'équilibrage des secteurs en terme de la charge horaire et de quantité épandue, comparer les opérations réalisées aux opérations planifiées et évaluer l'efficacité des tournées.

#### 3.3.3.1 Quantités épandues

La quantité épandue est établie par cumul des quantités attribuées aux segments de rue.

$$Q_s = \sum_{i=1}^{ns} Q_i \quad (23)$$

Où :

$Q_i$  = quantité de matériel d'épandage de rue  $i$

$ns$  = nombre total de segments assignés au secteur  $s$

Cet indicateur nous permettra de connaître les différentes quantités de matériel d'épandage nécessaires pour chaque secteur. Cette quantité dépend essentiellement des longueurs des rues associées à ces indicateurs.

### 3.3.3.2 Quantités normalisées

Cet indicateur présente la quantité de matériel d'épandage normalisé en fonction de la longueur d'une rue (exprimé en kg/km) pour chaque secteur.

$$Q_{\text{normalisé},s} = \frac{Q_s}{D_s} \quad (24)$$

Où :

$Q_s$  = quantité épandue pour le secteur  $s$

$D_s$  = sommation des longueurs des segments épandus attachés au secteur  $s$

### 3.3.3.3 Consommation moyenne

Cet indicateur est lié à la consommation moyenne de carburant en litre/heure des camions pour chaque secteur.

$$\bar{C}_s = \sum_{i=1}^{ns} \frac{\bar{C}_i}{ns} \quad (25)$$

Où :

$\bar{C}_i$  = consommation de rue  $i$

$ns$  = nombre total de segments assignés au secteur  $s$

La consommation du carburant par secteur nous permettra d'évaluer le coût associé à chaque secteur, ce qui va nous donner par la suite une idée sur l'équilibrage des charges en fonctions des coûts.

### 3.3.3.4 Taux de service

Cet indicateur calcule d'une manière relative le rapport entre le temps nécessaire pour les opérations d'épandage par rapport au temps total des tournées.

$$TOE_s = \frac{Tte_s}{T_s} \quad (26)$$

Où :

$Tte_s$  = temps total de la tournée d'épandage assignée au secteur  $s$

$T_s$  = temps total passé au secteur  $s$

Les opérations d'épandages de fondants et d'abrasifs ne se font pas en continu sur les segments routiers. En fait, la quantité épandue se fait en fonction des besoins ponctuels déterminés par l'opérateur selon l'état de la chaussée et les conditions météorologiques. Ainsi, nous pouvons déterminer le Taux de service, qui est la portion du temps où l'épandeur est en fonction dans chaque secteur.

### 3.3.3.5 Efficacité des tournées

Dans le cas de la municipalité étudiée, les opérateurs de véhicules n'ont pas à suivre un parcours préétabli et doivent se fier à leur expérience du terrain et à un certain historique dans leurs opérations. Pour déterminer l'efficacité des tournées, nous allons donc comparer la longueur des passages effectués sur la longueur totale des segments routiers du secteur, le tout normalisé par le nombre de voies. Il s'agit évidemment d'une mesure indirecte de l'efficacité.

$$Efficacité_s = \frac{\sum_{i=0}^{ns} nv_i \cdot D_i}{\sum_{i=0}^{ns} nbp_i \cdot D_i} \quad (27)$$

Où :

$ns$  = le nombre total des rues assignées au secteur  $s$

$D_i$  = la longueur de la rue  $i$

$nbp_i$  = nombre du passages dans la rue  $i$

$nv_i$  = nombre de voies de la rue  $i$

Cet indicateur est inférieur à 1, plus il est près de 1 plus la tournée est efficace.

### 3.3.3.6 Taux d'épandage

De façon similaire au taux d'opération d'épandage, le taux d'épandage est établi en fonction des longueurs de segments.

$$\% \text{épandage}_s = \frac{\sum_{i=0}^{nes} D_i}{\sum_{i=0}^{ns} D_i} \quad (28)$$

Où :

$ns$  = nombre de rues assignées au secteur  $s$

$nes$  = nombre de rues épandues assignées au secteur  $s$

$D_i$  = longueur de la rue  $i$

On considère le segment traité si et seulement si  $Q_i > 0$ .

### 3.3.3.7 Temps d'épandage basé sur les vitesses moyennes

Cet indicateur concerne le temps passé dans chaque secteur durant l'opération d'épandage, basé sur la vitesse moyenne d'épandage.

$$Te_s = \sum_{i=0}^{ns} Te_i \quad (29)$$

Où :

$Te_i$  = temps passé dans chaque rue  $i$  durant l'opération d'épandage basé sur la vitesse moyenne

$ns$  = nombre total de rues assignées au secteur

### 3.3.3.8 Temps passé dans chaque secteur

Ce dernier indicateur présente le temps accumulé par secteur pour tous les camions.

$$T_s = \sum_{i=0}^{ns} T_i \quad (30)$$

Où :

$T_i$  = temps total passé sur la rue  $i$

$ns$  = nombre de rues assignées au secteur  $s$

## 3.4 Élaboration des modèles

Comme il a été expliqué dans la revue de littérature, un des plus grand défis des opérations de déneigement est qu'on travaille avec beaucoup d'incertitude, d'où la nécessité de trouver des modèles de prédiction qui vont estimer la quantité adéquate de fondants et d'abrasifs assurant une meilleure circulation routière. Dans cette partie, nous allons essayer de trouver un modèle qui estime la quantité de fondants et d'abrasifs nécessaire pour chaque segment de rue.

Pour ce modèle, nous utilisons trois types de données :

- Données attachées au segment de rues
- Données météorologiques
- Données de télémétrie

### 3.4.1 Données attachées au segment de rues

Ces données offertes par la ville de Granby correspondent aux informations qui touchent chaque segment de rue :

- Type de rue (allée, autoroute, avenue, boulevard, chemin, etc.)
- Type de segment de rue (artère, collectrice, locale, etc.)
- Type de camionnage (permis ou interdit)
- Vitesse limite (km/h)
- Propriétaire (public, privé, MTQ, en dehors des limites de la ville)
- Sens unique (attention selon le sens de construction du segment)
- Présence de trottoir (selon le sens de construction à droite, gauche, aucun, des 2 côtés)
- Service d'égout/aqueduc disponible
- Largeur de rue (m)
- Nombre de voies
- Type de revêtement (asphalte, gravier)
- Circuit d'autobus
- Longueur de segment (m)



### 3.4.2 Données météorologiques

Les données météorologiques sont disponibles sur le site web : <https://meteo.gc.ca> cependant plusieurs informations importantes sont manquantes (température de surface, humidité, vitesse de vent) ; en plus le site web fournit seulement les données journalières et non pas horaire, ce qui va influencer la qualité de notre modèle.

- Température min
- Température max
- Quantité de neige au sol
- Précipitation totale (mm)

### 3.4.3 Données de télémétrie

Ce sont les données de télémétrie de toute la saison hivernale assignées à chaque segment de rue en utilisant les outils de SIG :

- La quantité de fondants et d'abrasifs quotidienne pour chaque segment
- La vitesse moyenne pour chaque segment de rue
- Le type de fondant et d'abrasif appliqué

Tous les éléments cités ci-dessus sont des facteurs pour notre modèle sauf la quantité de fondant et d'abrasifs qui est considérée comme la réponse du modèle. Il faut mentionner que l'on suppose que la quantité de fondants et d'abrasifs épandue par les camions assure une bonne circulation routière.

### 3.4.4 Outils de modélisation

Pour les outils modélisation nous avons utilisés trois modèles de prédiction pour estimer la quantité de fondants et d'abrasifs pour chaque segment de rue (on a utilisé logiciel Statistica [www.statsoft.fr](http://www.statsoft.fr) pour les trois modèles) :

- Régression multiple
- Réseaux de neurones
- Arbre de décisions

### 3.4.4.1 La régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple est l'outil statistique le plus utilisé pour l'étude des données multidimensionnelles qui vise à (Borcard, 2015) :

- Trouver le meilleur modèle de prédiction
- Estimer l'effet des variables indépendantes (explicatives) sur la réponse (variable dépendante)
- Évaluer l'importance des variables indépendantes dans le modèle
- Déterminer la qualité du modèle de prédiction

Le modèle de prédiction (m variables et n valeurs observées) est une équation linéaire qui s'écrit sous la forme :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \beta_3 x_{i,3} + \dots + \beta_m x_{i,m} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$\varepsilon_i$  représentent les écarts entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle.

Avec les hypothèses suivantes (Clément, 2015) :

- Les  $\varepsilon_i$  sont des termes d'erreur (les écarts entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle) indépendants tel que leur espérance et leur variance sont respectivement 0 et  $\sigma^2$
- Les termes  $x_{i,j}$  j sont supposés déterministes (facteurs contrôlés)
- Les paramètres inconnus  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$  sont supposés constants
- Les  $\varepsilon_i$  suivent une distribution normale  $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$

L'estimation des paramètres :

Pour estimer les paramètres  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$  et  $\sigma$  on utilise la méthode de moindres carrés qui minimise la somme des carrés des termes d'erreurs :

$$\min \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \min \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{i,1} - \beta_2 x_{i,2} - \beta_3 x_{i,3} - \dots - \beta_m x_{i,m})^2$$

La solution est obtenue en utilisant la dérivation matricielle de la dernière équation (Rakotomalala, 2015).

### 3.4.4.2 Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones, inspirés du fonctionnement des neurones biologiques sont composés de neurones artificiels simples, qui permettent de créer des modèles de prédiction complexe en utilisant des fonctions mathématiques simples.

Les neurones reçoivent des signaux d'entrée (inputs) qui seront pondérés par un poids  $W_i$  (figure 3.4), les inputs pondérés seront par la suite sommés et comparés à un seuil d'activation  $\theta$  puis ils créent l'output en passant par des fonctions du neurone (LaBarre, 2015).

Ces neurones forment un type de maillage entre eux (réseau de neurones) de telle sorte que les outputs des neurones d'une couche deviennent les inputs des neurones de la couche suivante.

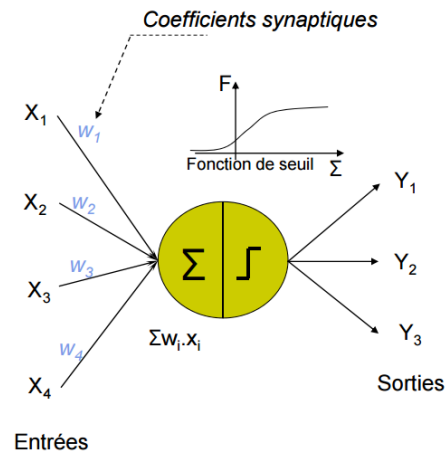


Figure 3.4: Structure des neurones (Agard, 2015)

### 3.4.4.3 Arbre de décision :

C'est l'ensemble de règles de classification structurées d'une manière arborescente, selon des décisions basées sur les tests associés aux variables explicatives. Un arbre de décision est composé de nœuds, de branches et de feuilles, chaque nœud teste un attribut, chaque branche correspond à la valeur d'un attribut, chaque feuille opère une classification (Agard, 2015).

Selon Rakotomalala, 2005 : « Il s'agit de trouver un partitionnement des individus que l'on représente sous la forme d'un arbre de décision. L'objectif est de produire des groupes d'individus les plus homogènes possibles du point de vue de la variable à prédire. Il est d'usage

de représenter la distribution empirique de l'attribut à prédire sur chaque sommet (nœud) de l'arbre ».

Le point fort de la méthode repose sur sa simplicité, elle est aussi une méthode non paramétrique, non linéaire, robuste et qui permet la présence de données manquantes (Clément, 2015).

## CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats de l'application de la méthodologie développée au troisième chapitre. Tout d'abord, des mesures des indicateurs sont présentées. Il faut noter que tous les indicateurs présentés dans ce chapitre le sont à titre d'exemple et ne doivent pas être utilisés sans une interprétation plus avancée avec la Ville de Granby. Ensuite, il y a une visualisation cartographique des indicateurs et enfin nous présentons les résultats des modèles de prédiction.

### 4.1 Les mesures des indicateurs

Dans cette section, nous présentons quelques indicateurs calculés dans l'étude de cas. Cela permet de déterminer leur pertinence, en plus de pouvoir détecter des données manquantes ou erronées.

#### 4.1.1 Mesures de performance par secteur

Le tableau 4.1 présente les indicateurs de performance calculés pour la journée du 11 mars 2014.

L'examen de ce tableau permet de remarquer la disparité des différents indicateurs parmi les secteurs de la ville, dont les données, rappelons-le, ne touchent qu'une seule journée d'opération. Des données aberrantes apparaissent pour le secteur 7 (en gras), ce qui demande plus d'investigation. Après discussion avec la ville, nous constatons que certaines données sont manquantes et que certaines parties de ces secteurs sont desservies par des entrepreneurs privés, qui ne sont pas dotés d'équipements de télémétrie qui collectent des données sur les quantités épandues.

Les indicateurs par secteur sont donc matière à interprétation. Par contre, des indicateurs normalisés comme les quantités épandues normalisées, le taux d'épandage et la consommation moyenne de carburant demeurent intéressants dans le contexte de l'opération individuelle des véhicules.

En comparant les différents indicateurs de performance on constate que les secteurs ne sont pas équilibrés ; par exemple, le temps passé par secteur varie entre 30 minutes (secteur 11) et 4h (secteur 1) même si ce sont deux secteurs qui ont les mêmes longueurs de rues.

Tableau 4.1 : Mesures de performance par secteur (données du 11 mars 2014)

Secteur	Longueur (km)	Qtés épandues (kg)	Qtés norm. (kg/km)	Consom. moyenne (L/h)	Taux de service	Efficacité des tournées	Taux épandage	Temps épandage	Temps passé
1	45,755	2577	56,32	9,271	68%	54%	69%	01:34:08	04:25:03
2	49,402	3885	78,64	10,79	73%	49%	43%	01:02:38	04:03:42
3	48,033	6816	141,90	12,74	72%	34%	66%	01:30:47	06:32:22
4	55,133	6473	117,40	10,84	84%	63%	75%	02:00:08	04:29:45
5	45,290	3930	86,77	13,28	79%	58%	69%	01:17:03	03:01:06
6	57,248	3190	55,72	8,23	73%	51%	42%	00:53:04	01:52:05
7	67,174	8219	122,35	9,37	-	74%	<b>6%</b>	<b>00:09:35</b>	03:37:30
8	50,510	6286	124,44	10,89	40%	64%	61%	01:28:16	01:06:13
9	68,646	760	11,071	6,40	87%	77%	18%	00:25:11	00:43:20
10	36,092	6162	170,72	11,11	99%	68%	70%	01:22:03	02:15:35
11	45,026	5914	131,34	8,36	36%	62%	36%	00:54:57	00:33:50

#### 4.1.2 Mesures de performance par segment de rue

Dans le contexte où les données par secteur ne donnent qu'un portrait global de la situation, nous pouvons nous rabattre sur les indicateurs de performance par segment de rue, qui sont beaucoup plus précis et permettent à la municipalité d'apprécier l'offre de service accordée aux citoyens de façon détaillée.

Le tableau 4.2 présente à titre d'exemple des indicateurs calculés pour certains segments de rue. Nous remarquons d'abord une disparité dans les longueurs de segment, ce qui nous amène à nous intéresser aux indicateurs normalisés. D'abord, il faut constater que certains segments reçoivent peu, sinon pas, de fondants et d'abrasifs, ce qui peut s'expliquer par la topographie des lieux (plat), l'absence d'arrêts obligatoires ou l'état de la chaussée. Les vitesses sont très variables et

dépendent également de ces conditions. Le segment 1135 a vu 15 passages de véhicules, mais peu d'épandage, car il se trouve près du lieu de dépôt des véhicules, d'où ceux-ci partent et entrent régulièrement, notamment pour se recharger durant la journée. La consommation moyenne de carburant dépend, outre des conditions de marche, de l'âge et du type de véhicule.

L'utilisation de la cartographie thématique permet d'apprécier plus spécifiquement les indicateurs sur les segments en fonction de leur localisation géographique.

Tableau 4.2: Indicateurs de performance associés aux segments de rue (données du 11 mars 2014)

<i>Segment</i>	<i>Longueur (m)</i>	<i>Qtés épandues (kg)</i>	<i>Qtés norm. (kg/km)</i>	<i>Temps passé</i>	<i>Vit. moy. d'épandage (km/h)</i>	<i>Vit. moy. (km/h)</i>	<i>Consom. moyenne (L/h)</i>	<i>Temps épandage</i>	<i>Nb passages</i>
13	214,63	1	4,66	00:00:26	13,35	28,09	28,11	00:00:58	1
76	438,98	30	68,34	00:02:28	30,37	31,44	8,96	00:00:52	3
112	159,28	115	721,99	00:01:37	9,83	15,63	24,58	00:00:58	3
117	102,17	42	411,09	00:01:05	11,18	14,83	12,36	00:00:33	3
1135	172,24	11	63,86	00:04:50	22,62	31,88	7,29	00:00:27	15
1430	169,71	1	5,89	00:00:19	32,79	28,41	8,79	00:00:19	1
1512	106,40	43	404,15	00:02:02	23,93	25,49	9,32	00:00:16	8
1705	152,31	8	52,52	00:00:51	38,06	26,04	20,01	00:00:14	2
2510	269,12	69	256,38	01:38	21,86	21,11	17,32	00:00:44	2
2511	94,58	1	10,57	00:13	28,42	24,59	10,23	00:00:12	1
3048	55,21	1	18,11	00:00:11	39,88	37,70	6,46	00:00:05	2
3049	142,93	0	0,00	00:00:28		30,41	20,63	00:00:00	2
3110	222,86	0	0,00	00:00:08		62,79	18,30	00:00:00	1
3111	226,51	101	445,90	00:00:48	37,88	34,85	8,72	00:00:22	2

L’affichage géographique des indicateurs permet donc d’observer des phénomènes territoriaux qui sont difficilement identifiables autrement, ce qui permet à l’opérateur une meilleure maîtrise de sa planification.

## 4.2 Visualisation des indicateurs de performance par segment de rue

Dans cette section, nous présentons des représentations cartographiques des indicateurs, réalisées grâce au logiciel QGIS.

### 4.2.1 Quantités épandues

Cet indicateur représente la quantité totale de matériel épandue pour chaque segment de rue (en kg).

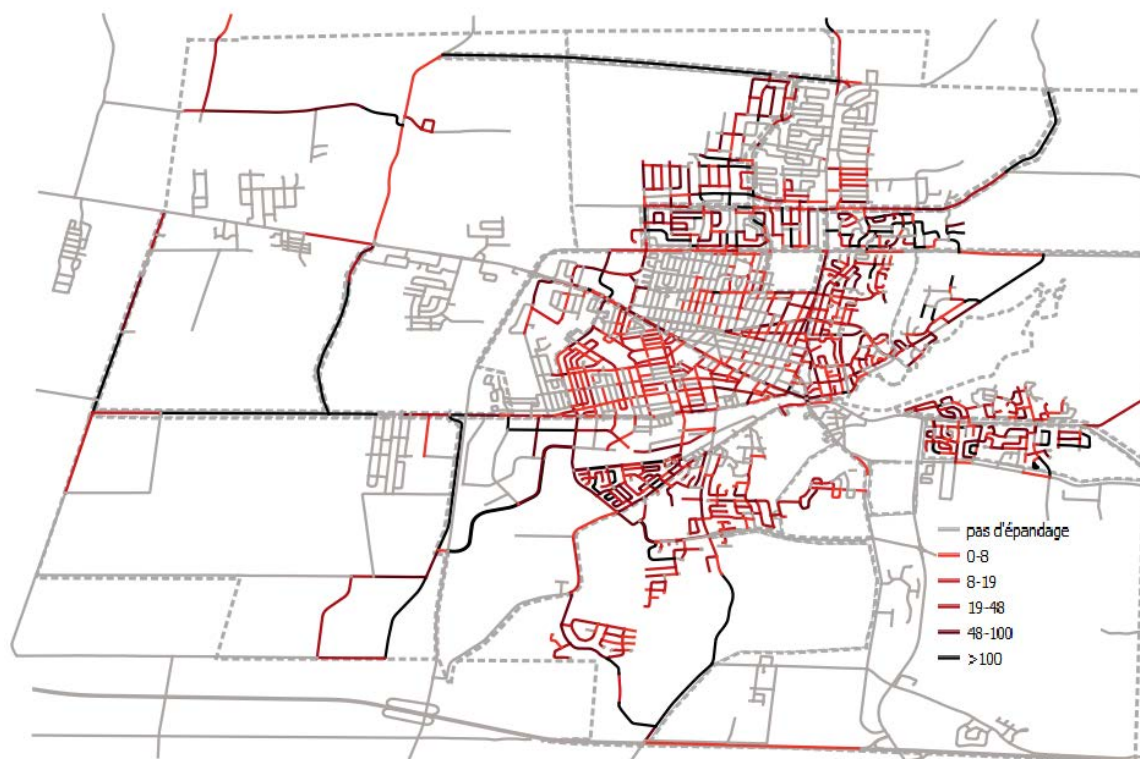


Figure 4.1: Présentation cartographique de la quantité de matériel épandue





Un ensemble de segments de rues situés au coin nord-est retient notre attention. Il s'agit d'un endroit où les quantités épandues sont plus élevées. En effet, dans ce quartier on épand surtout des abrasifs (sable, gravier), qui sont plus lourds, pour protéger la nappe phréatique et la source d'eau municipale du sel dissous.

### 4.2.3 Temps total passé

Cet indicateur compile le temps total de tous les camions passé dans un segment de rue, ce qui est en fait le nombre total des points assignés à un segment divisé sur 2 (chaque point représentant une demi-seconde).

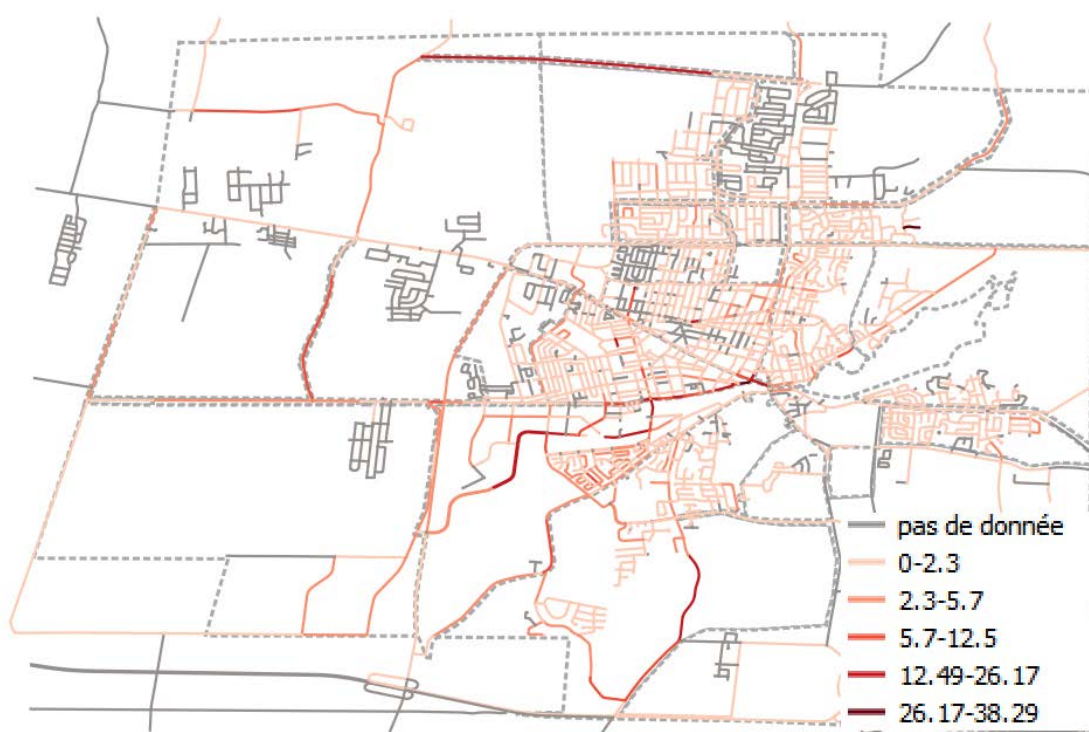


Figure 4.3: Présentation cartographique du temps total de tous les camions passé dans un segment de rue (en s)

La figure 4.3 est une présentation cartographique du temps passé par l'ensemble des camions sur les segments. Les segments foncés sur la carte représentent soit les segments les plus longs, soit les segments critiques où on a plusieurs passages de camions.

### 4.2.4 Vitesse moyenne d'épandage

Cet indicateur concerne la vitesse moyenne des camions durant l'opération d'épandage pour chaque segment de rue.

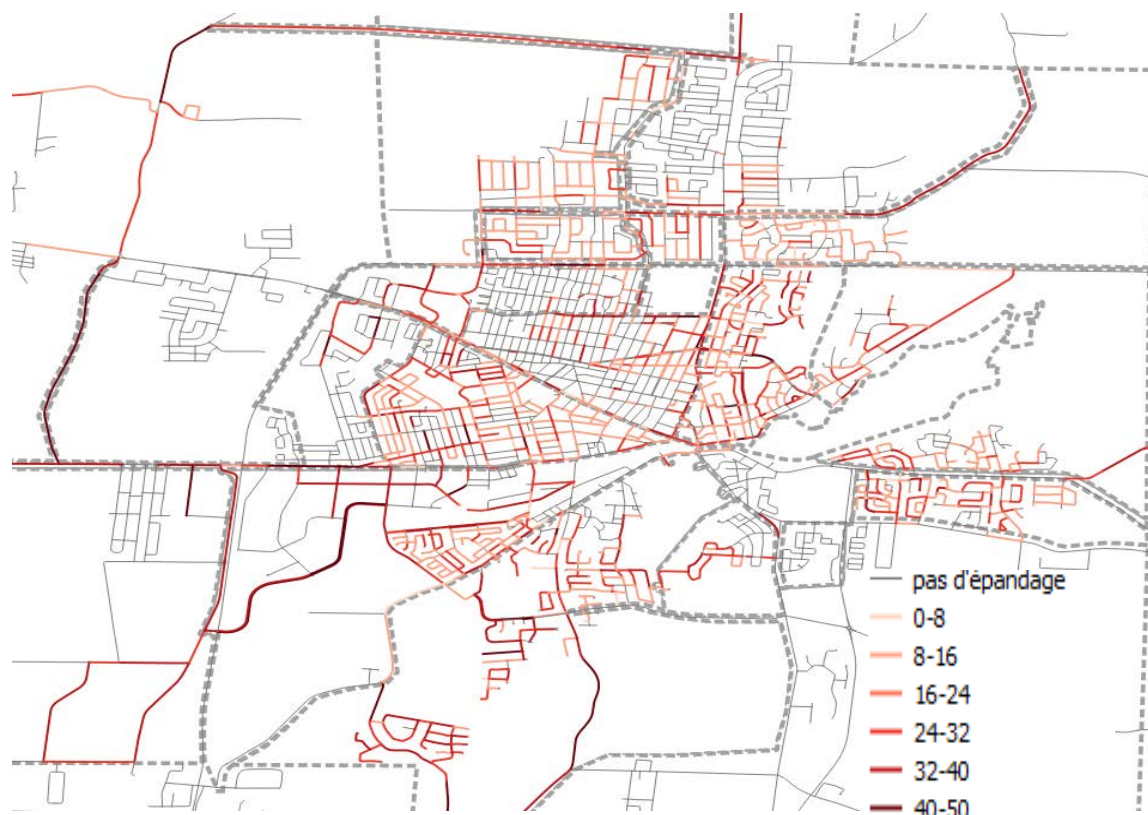


Figure 4.4: Présentation cartographique des vitesses moyennes d'épandage (en km/h)

La figure 4.4 est une présentation cartographique des vitesses moyennes d'épandage pour chaque segment. On peut remarquer qu'au centre-ville, les vitesses d'épandage sont plus faibles en comparaison avec les segments qui se trouvent à l'extrémité de la ville. Cela est expliqué par le fait qu'au centre-ville, il y a beaucoup d'intersections et les vitesses limites sont plus basses.

### 4.2.5 Vitesse moyenne

Cet indicateur représente la vitesse moyenne des camions pour chaque segment de rue, en mode épandage ou non.

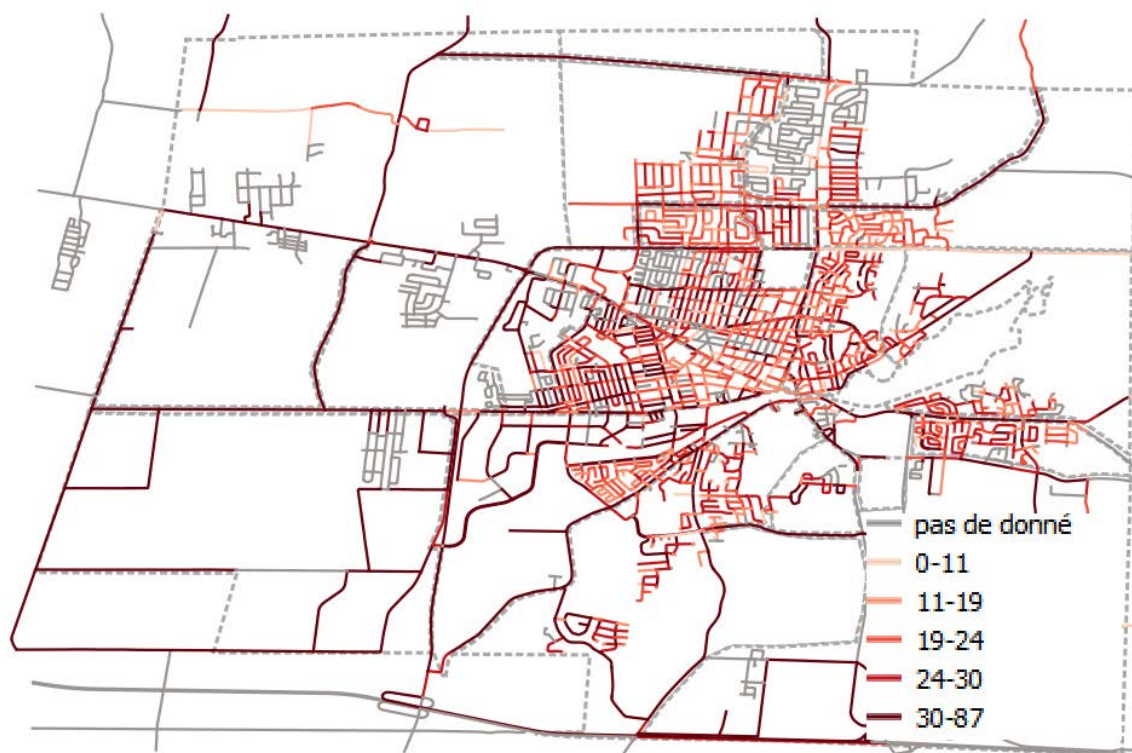


Figure 4.5: Présentation cartographique des vitesses moyennes (en km/h)

La figure 4.5 est une présentation cartographique des vitesses moyennes pour chaque segment. On peut remarquer qu'au centre-ville les vitesses d'épandage sont plus faibles en comparaison avec les segments qui se trouvent à l'extrémité de la ville, cela est expliqué par le fait qu'au centre-ville il y a beaucoup d'intersections et les vitesses limites sont plus basses. Par contre, les vitesses moyennes sont plus élevées par rapport aux vitesses d'épandage car les camions roulent à des vitesses avoisinant les 23 km/h durant l'épandage.

#### 4.2.6 Consommation moyenne

La consommation moyenne de carburant en litre/heure des camions peut être déterminée pour chaque segment de rue.



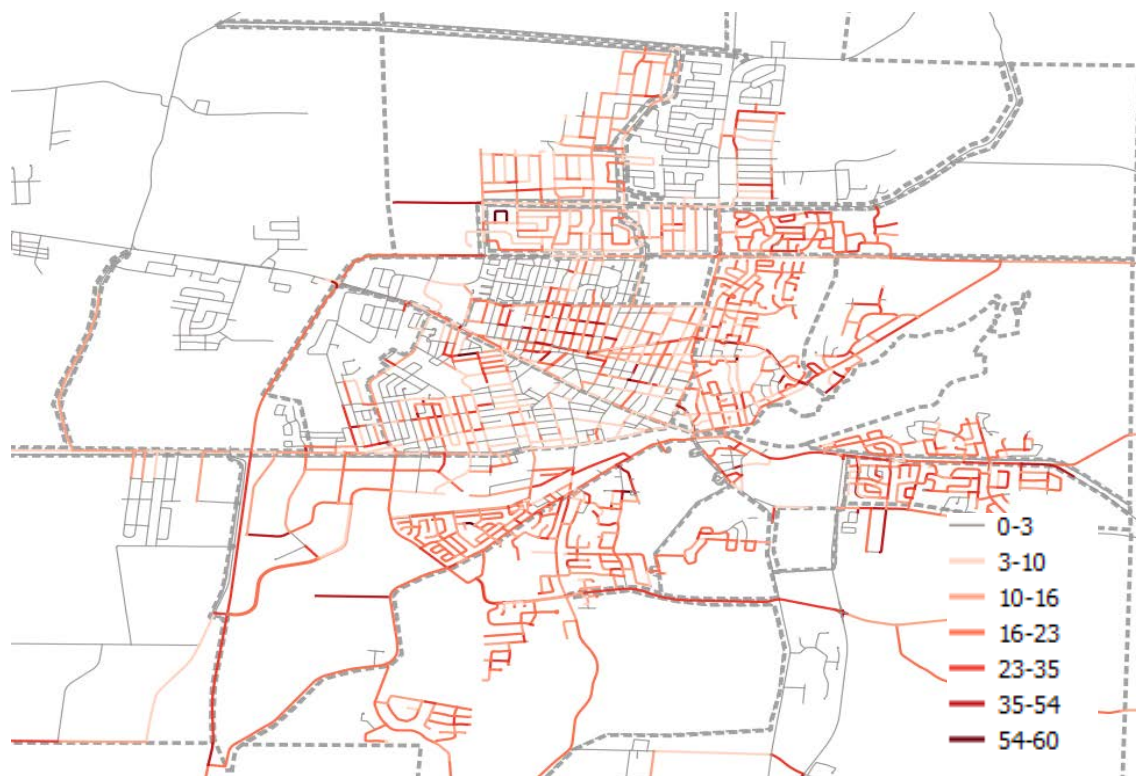


Figure 4.6: Présentation cartographique de la consommation moyenne (en l/h)

La figure 4.6 est une présentation cartographique de la consommation moyenne, pour avoir une explication claire de la consommation on doit avoir d'autres informations comme les pentes, les nombres d'arrêts...

#### 4.2.7 Temps d'épandage basé sur la vitesse moyenne

Cet indicateur compile le temps passé sur chaque segment de rue durant l'opération d'épandage basé sur la vitesse moyenne d'épandage.

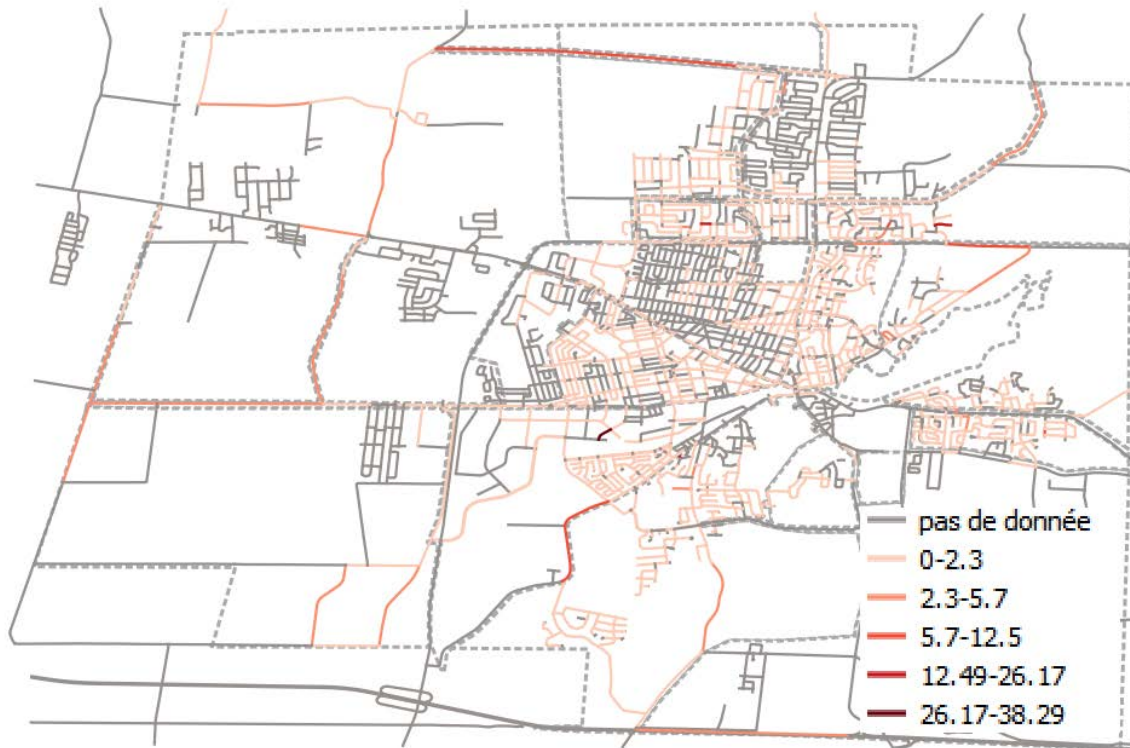


Figure 4.7: Présentation cartographique du temps d'épandage calculé à partir des vitesses moyennes (en s)

La figure 4.7 est une présentation cartographique du temps d'épandage calculé à partir des vitesses moyennes. D'après la carte, on remarque qu'en général les segments longs ont un temps plus élevé par rapport aux autres segments.

#### 4.2.8 Nombre de passages

Cet indicateur sert à représenter le nombre de passages pour tous les camions pour chaque segment de rue (par exemple, un aller-retour compte pour deux passages). Pour le calculer, nous utilisons la vitesse moyenne.

$$nbp_i = \frac{\bar{V}_i \cdot T_i}{D_i}$$

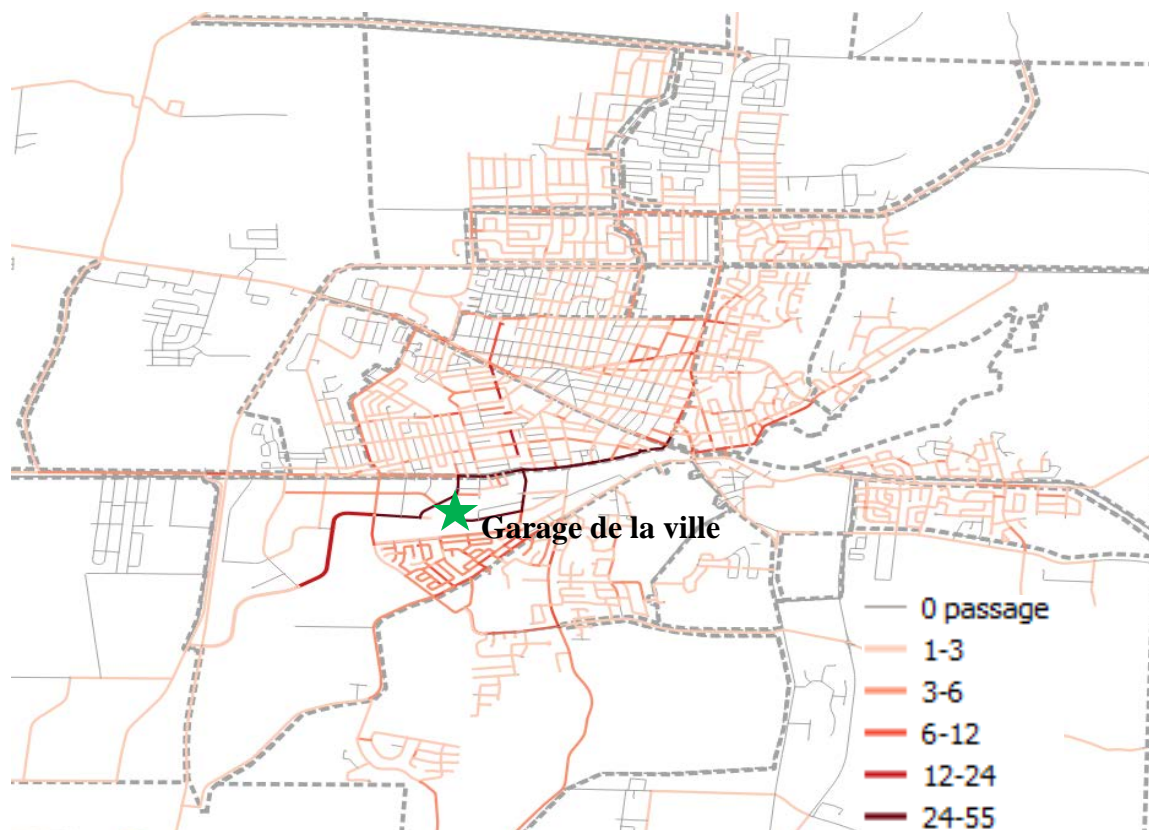


Figure 4.8: Présentation cartographique du nombre de passage des camions

La figure 4.8 est une présentation cartographique du nombre de passage des camions pour chaque segment. Les segments foncés sur la carte présentent les segments près du garage de la ville donc ces segments sont les chemins de départ des camions.

### 4.3 Visualisation des indicateurs de performance par secteur

Outre les indicateurs classiques comme la quantité épandue, la consommation de carburant et le temps accumulé dans chaque secteur, cette partie traite aussi des nouveaux indicateurs qui seront utiles pour les décideurs tels que le taux d'épandage, le taux des opérations d'épandage et l'efficacité des tournées établie par secteur. Le secteur est établi ici selon l'appartenance géographique de chaque segment de rue aux secteurs.

Les indicateurs développés dans cette partie vont servir à évaluer l'équilibre des secteurs en termes de la charge horaire et de la quantité épandue, comparer les opérations réalisées aux opérations planifiées et évaluer l'efficacité des tournées.

### 4.3.1 Quantités épandues

La quantité épandue est établie par cumul des quantités attribuées aux segments de rue.

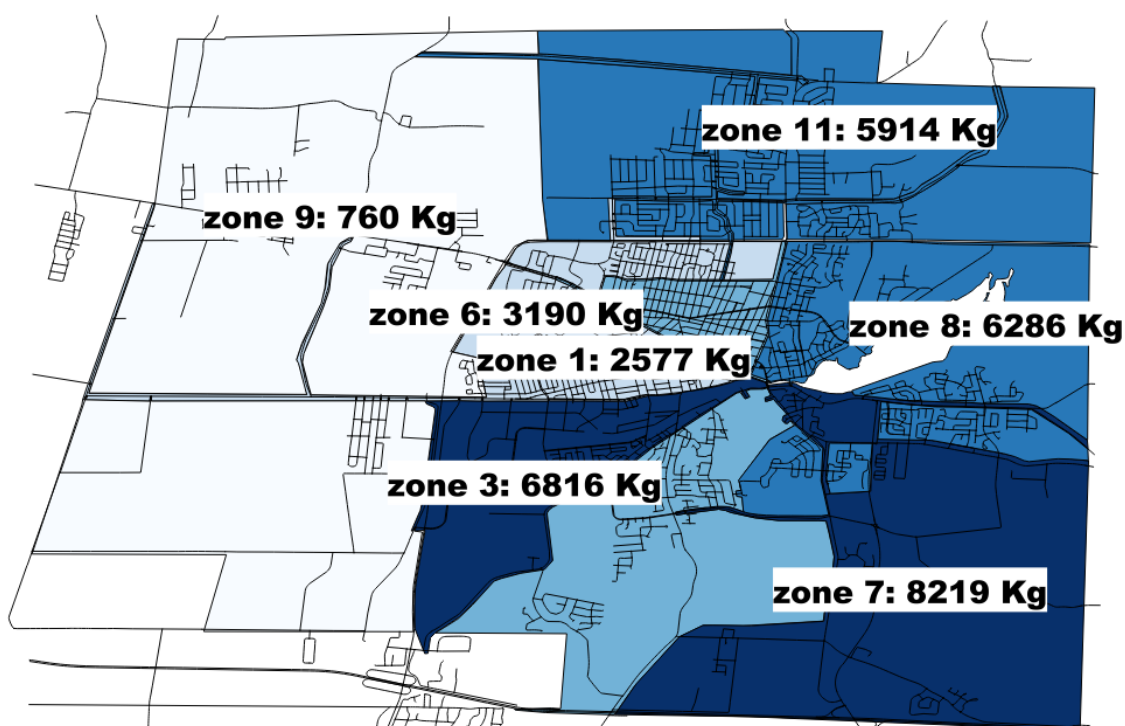


Figure 4.9: Présentation cartographique de la quantité des matériels d'épandage (en kg)

La figure 4.9 est une présentation cartographique de la quantité du matériel d'épandage par secteur, on peut remarquer que la zone 9 a la plus faible quantité de matériel car cette zone est moins peuplée.

### 4.3.2 Quantités normalisées

Cet indicateur présente la quantité de matériel d'épandage normalisée en fonction de la longueur d'une rue (exprimé en kg/km) pour chaque secteur.



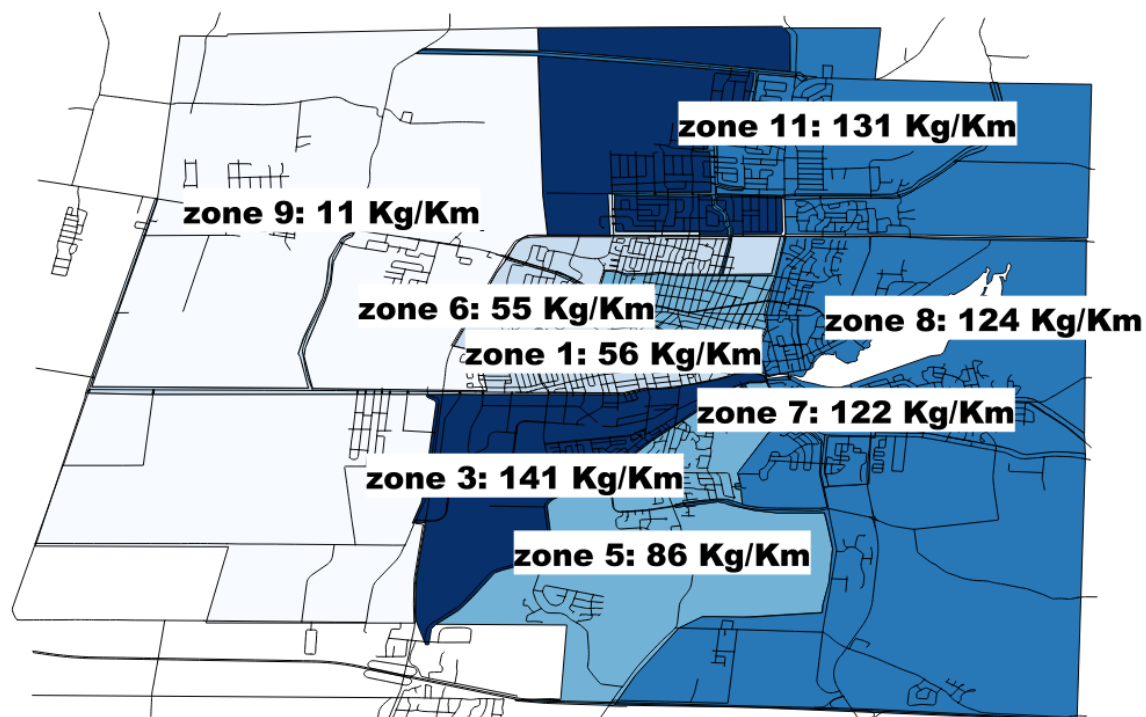


Figure 4.10: Présentation cartographique de la quantité des matériels normalisée (en kg/km)

La figure 4.10 est une présentation cartographique de la quantité du matériel normalisée par secteur, la répartition des secteurs importants sur la carte a changé en divisant la quantité du matériel par les longueurs des rues.

### 4.3.3 Consommation moyenne

Cet indicateur est lié à la consommation moyenne de carburant en litre/heure des camions pour chaque secteur.

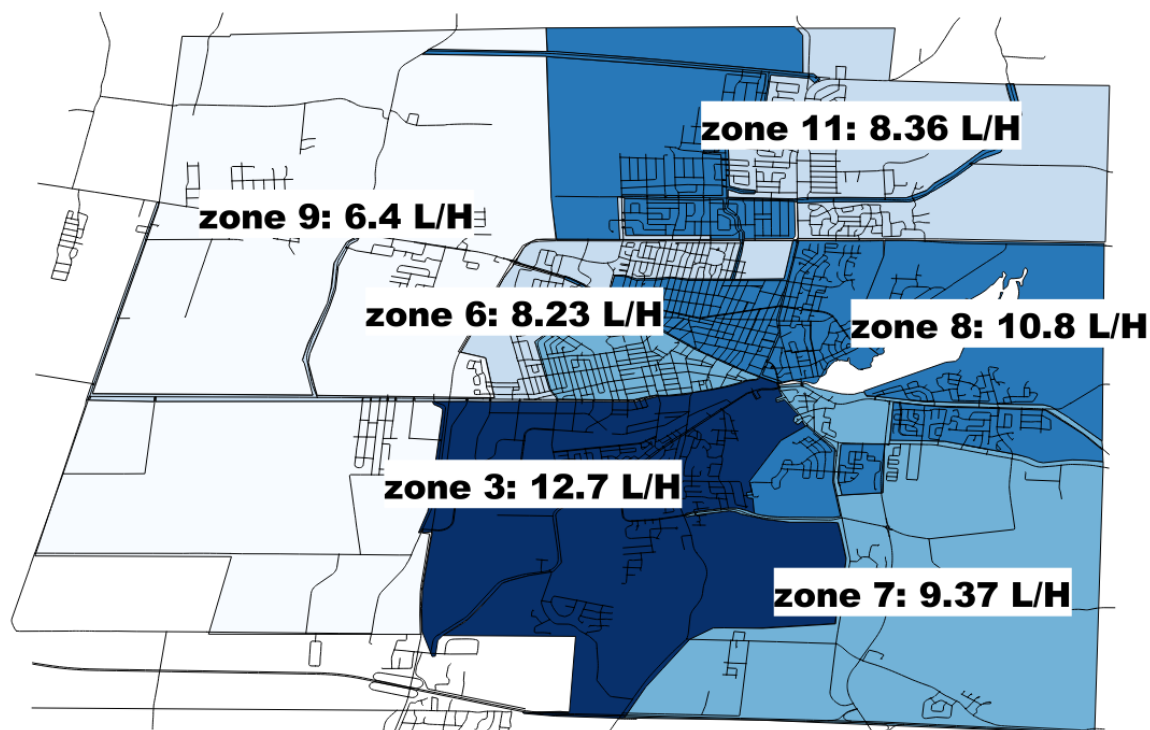


Figure 4.11: Présentation cartographique de la consommation moyenne (en l/h)

La figure 4.11 est une présentation cartographique de la consommation moyenne par secteur, on remarque que la zone 3 a la consommation la plus élevée car le garage de la ville est localisé dans cette zone (les camions s'échauffent le matin avant de commencer les tournées).

#### 4.3.4 Taux de service

Cet indicateur calcule le rapport entre le temps nécessaire pour les opérations d'épandage par rapport au temps total des tournées, l'indicateur est présenté en pourcentage.

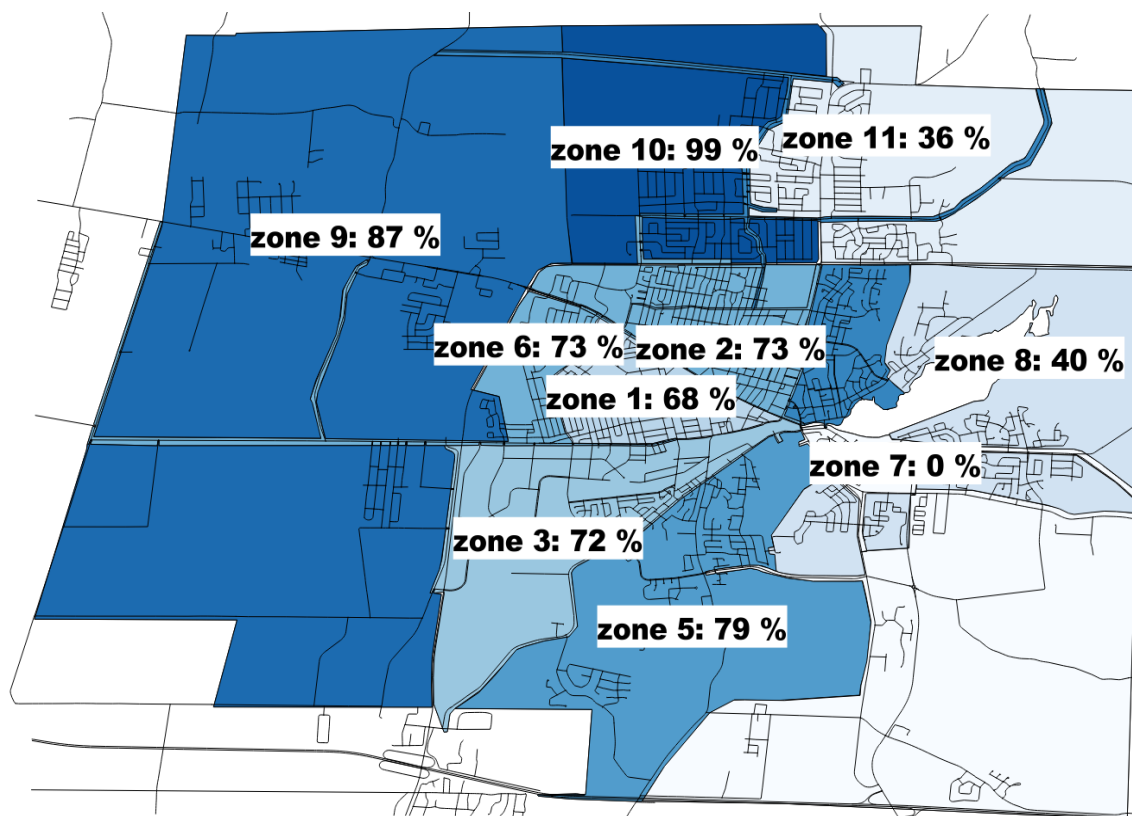


Figure 4.12: Présentation cartographique du taux de service

La figure 4.13 est une présentation cartographique du taux d'opération d'épandage. Les taux d'opération d'épandage des secteurs 10 et 9 sont élevés par rapport aux autres secteurs, parce que pour cette journée les camions ont passé une seule fois. Par contre, pour les secteurs 11 et 8 les camions ont passé plus qu'une fois dans la journée et n'ont pas eu à appliquer autant de matériel à chaque passage.

#### 4.3.5 Efficacité des tournées

Dans le cas de la municipalité étudiée, les opérateurs de véhicules n'ont pas à suivre un parcours préétabli et doivent plutôt concevoir un parcours en se fiant à leur expérience du terrain et à un certain historique dans leurs opérations. Pour déterminer l'efficacité des tournées, nous allons donc comparer la longueur des passages effectués sur la longueur totale des segments routiers du secteur, le tout normalisé par le nombre de voies. Il s'agit évidemment d'une mesure indirecte de l'efficacité.

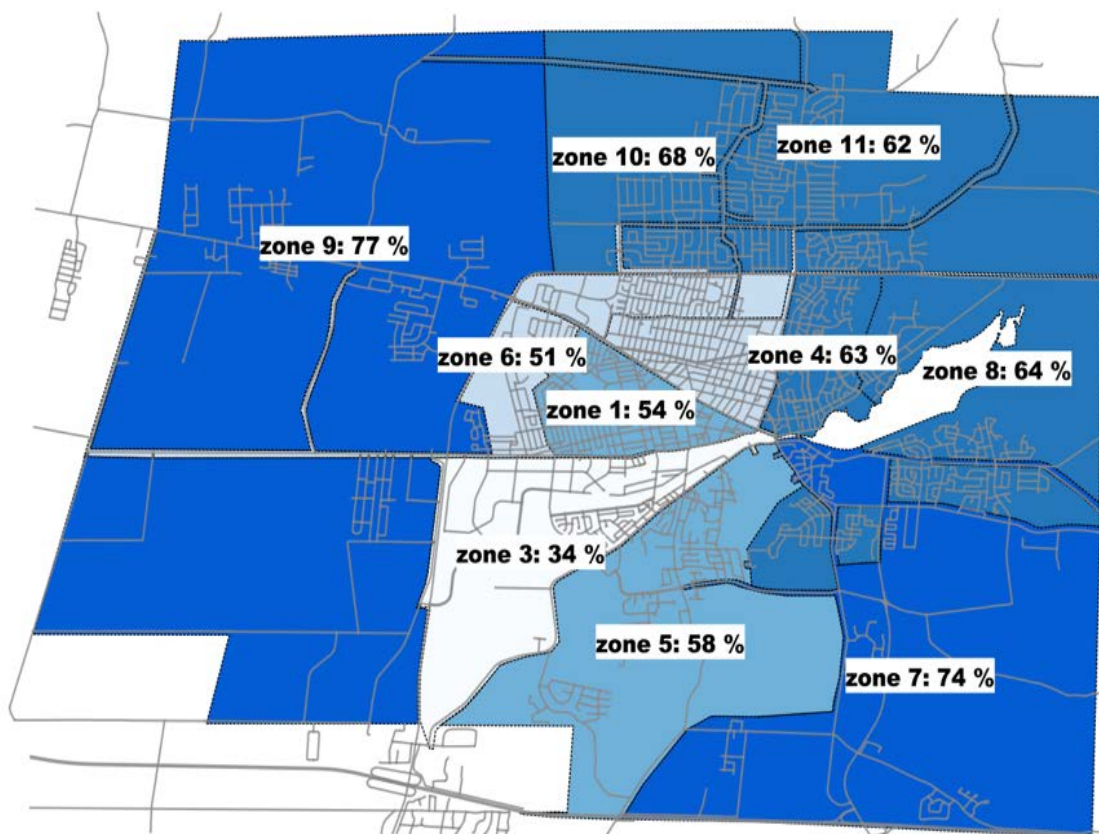


Figure 4.13: Présentation cartographique de l'efficacité des tournées

La figure 4.13 est une présentation cartographique d'efficacité de tournées. Le fait d'avoir le garage de la ville dans la zone 3 fait en sorte que son indicateur est faible, parce que le nombre de passages dans cette zone est important. Pour la zone 7, on ne possède pas de données mais le passage des camions des autres zones par la zone 7 nous donne quand même une valeur.

### 4.3.6 Taux d'épandage

De façon similaire au taux d'opération d'épandage, le taux d'épandage est établi en fonction des longueurs de segments.

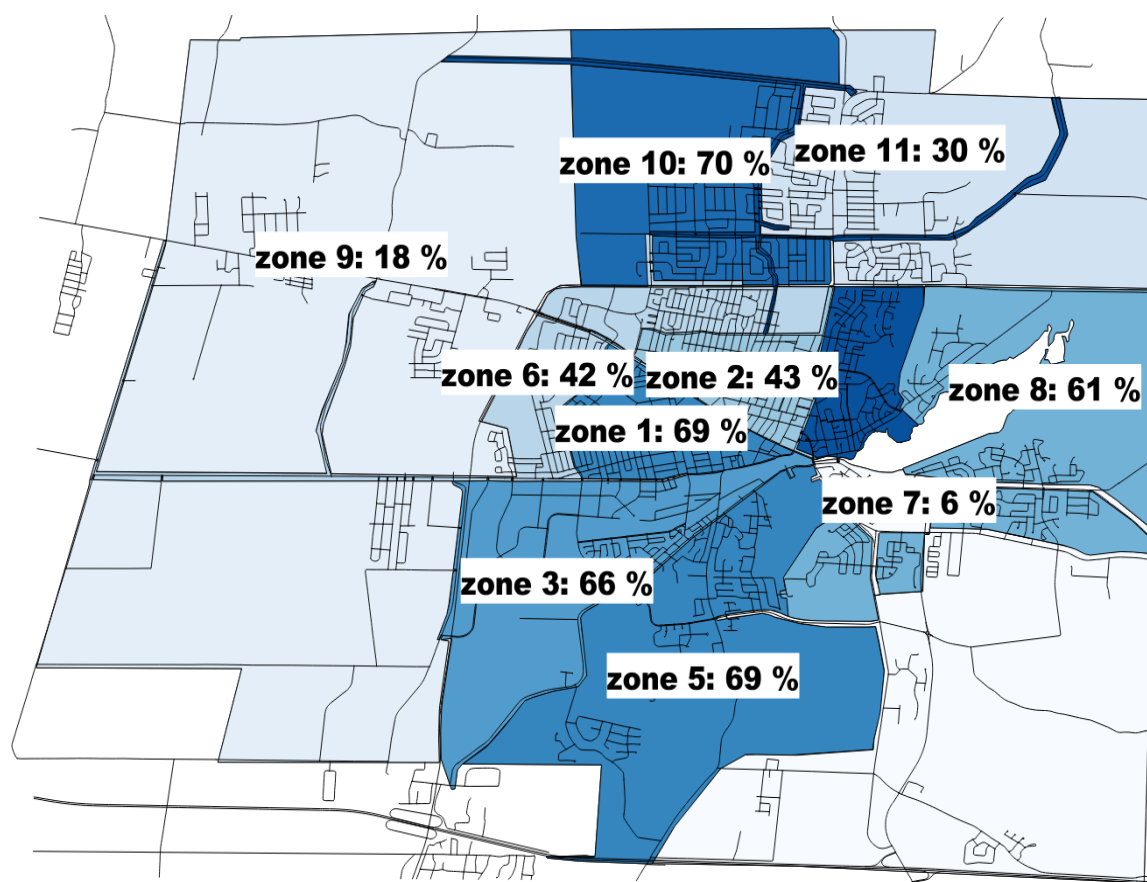


Figure 4.14: Présentation cartographique du taux d'épandage

La figure 4.14 est une présentation cartographique du taux d'épandage, d'après la carte on peut observer que les zones qui sont près du centre-ville ont un taux d'épandage plus élevé. Cependant, pour la zone 7 on a un manque de données.

#### 4.3.7 Temps d'épandage basé sur les vitesses moyennes

Cet indicateur concerne le temps passé dans chaque secteur durant l'opération d'épandage, basé sur la vitesse moyenne d'épandage.

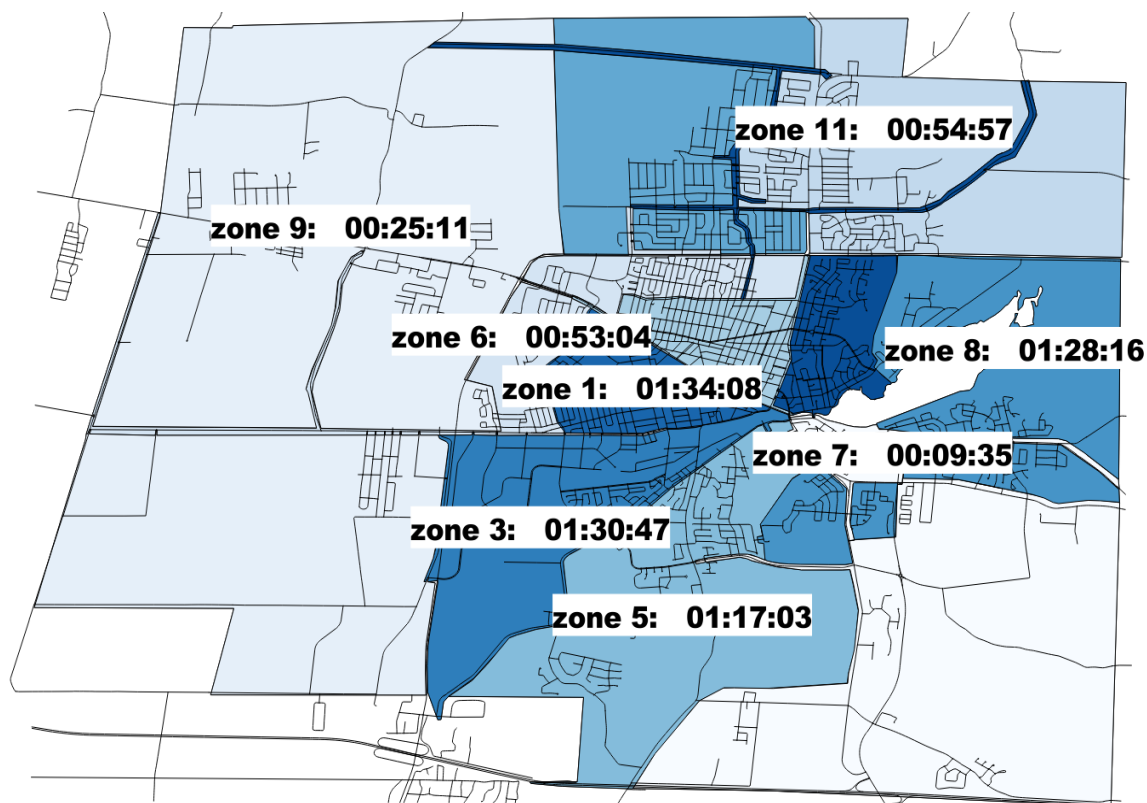


Figure 4.15: Présentation cartographique du temps total d'épandage (théorique)

La figure 4.15 est une présentation cartographique du temps d'épandage théorique. D'après la carte, les zones ne sont pas bien équilibrées en termes de charge horaire.

### 4.3.8 Temps passé dans chaque secteur

Ce dernier indicateur présente le temps accumulé par secteur pour tous les camions.

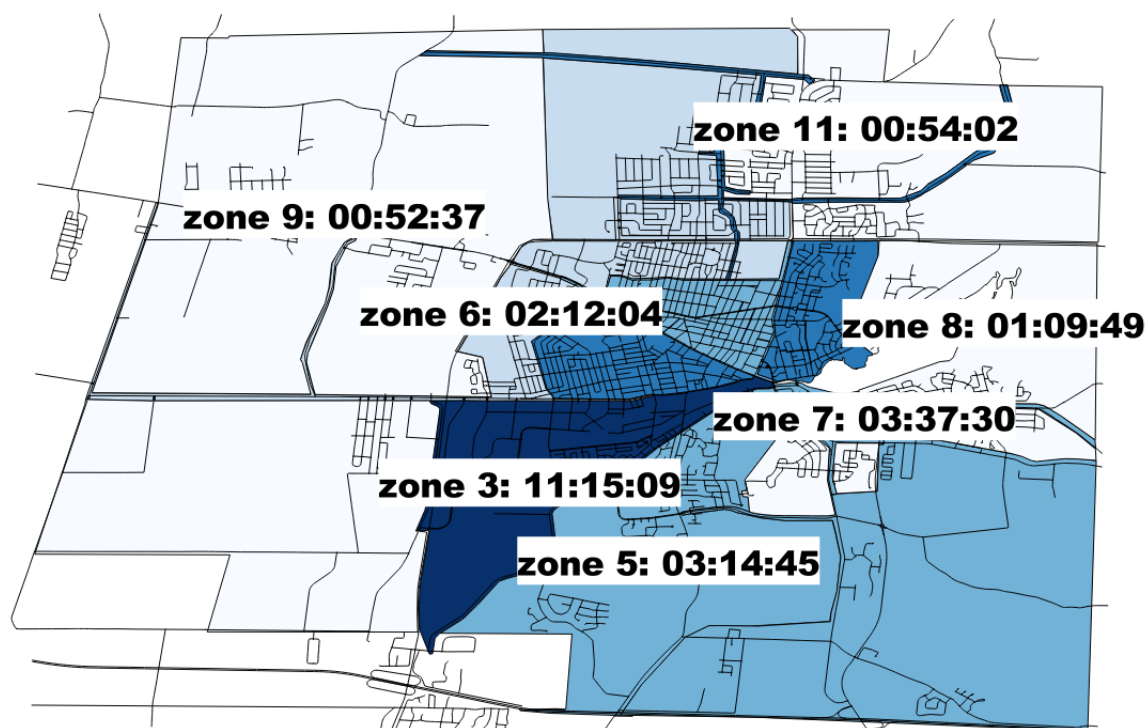


Figure 4.16: Présentation cartographique de temps passé par secteur pour tous les camions

La figure 4.16 est présentation cartographique de temps passé par secteur pour tous les camions, puisque le garage de la ville est localisé dans la zone 3, on peut comprendre la raison d'une durée de 11h.



## 4.4 Résultat des modèles de prédiction

Dans cette partie, nous présentons 3 modèles de prédiction pour estimer la quantité de fondants et d'abrasifs en utilisant ces méthodes :

- la régression multiple;
- les réseaux de neurones;
- l'arbre de classification.

Les modèles sont appliqués à l'ensemble de la saison de déneigement 2014-2015.

### 4.4.1 Régressions multiples

La première méthode utilisée pour estimer la quantité totale de fondants et d'abrasifs est la régression multiple. L'avantage de ce modèle est la simplicité d'interprétation mais il n'arrive pas à expliquer la majorité du phénomène, avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0.46$ .

Le tableau 4.3 présente les facteurs avec leur p-value. Les facteurs en rouge sont les facteurs qui sont jugés significatifs dans un intervalle de confiance à 95%. On peut remarquer que les facteurs comme la largeur, le type de revêtement, le type de camion et la présence de trottoirs n'ont pas un effet significatif sur les quantités. Pour les facteurs significatifs, le facteur longueur est le plus important car il est évidemment corrélé à la quantité.



Tableau 4.3: Tableau de p-value des facteurs de modèle de regression multiple

Effet	SS	degré de liberté	MS	F	P
Intercept		0			
Longueur(m)	8046702	1	8046702	4454,528	0,000000
Pluie tot. (mm)	8083	1	8083	4,475	0,034424
Neige au sol (cm)	46277	1	46277	25,618	0,000000
Précip. tot. (mm)	33584	1	33584	18,591	0,000016
TPMAX(°C)	181933	1	181933	100,715	0,000000
TPMIN(°C)	128691	1	128691	71,241	0,000000
NOMBREVOIE	6991	1	6991	3,870	0,049179
LARGEUR(m)	1123	1	1123	0,622	0,430398
REVETEMENT	3331	2	1665	0,922	0,397764
CIRCUIT AUTOBUS	4857	1	4857	2,689	0,101103
TYPE SEGMENT RUE	36331	3	12110	6,704	0,000162
SERVICE AQUEDUC	382331	11	34757	19,241	0,000000
TYPECAMIONNAGE	3930	2	1965	1,088	0,336971
VITESSE(km/h)	162549	4	40637	22,496	0,000000
PROPRIETAIRE	132683	2	66342	36,726	0,000000
TYPE SENS UNIQUE	6309	4	1577	0,873	0,479027
TROTTOIR	3199	3	1066	0,590	0,621304
type de rue	46009	10	4601	2,547	0,004557
Error	18795691	10405	1806		

Le graphique suivant (figure 4.17) présente les valeurs estimées par le modèle en fonction des valeurs observées, on peut constater que le modèle n'explique pas tout.

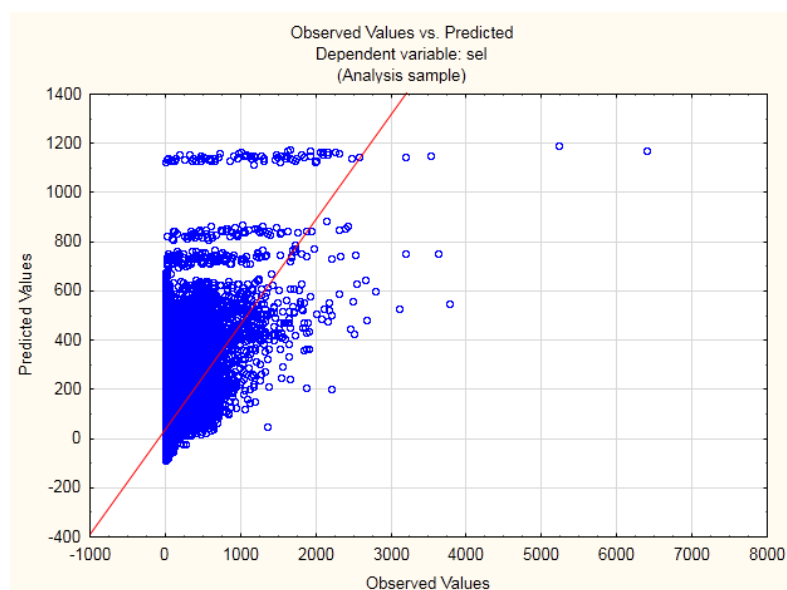


Figure 4.17: Valeurs observées en fonction des valeurs prédites

#### 4.4.2 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont des algorithmes puissants qui peuvent modéliser toute sorte de fonction, composés de deux phases : une phase d'apprentissage et une phase d'exploitation. Par contre, un inconvénient de cette méthode est qu'elle est considérée comme une « boîte noire » dont les résultats sont difficiles à interpréter.

Le tableau 4.4 présente les meilleurs résultats obtenus avec les réseaux de neurones, les quatre réseaux sont à deux couches, la première couche se décompose d'une couche caché (fictive) la deuxième couche contient la réponse.

Parmi ces quatre réseaux le meilleur est le dernier **MLP 91-9-1** (tableau 4.4) avec une validation de 75%. MLP (Multi-Layer Perceptron) le perceptron multicouches, ici on a deux couche (une caché contient 9 neurones avec une fonction d'activation exponentiel et l'autre c'est la couche de sortie avec une fonction d'activation logistique, le chiffre 91 présente le nombre des inputs les facteurs continus + les modalités des facteurs catégoriques).

Tableau 4.4 : Les résultats obtenus avec les réseaux neurones

Type de réseau	Performance d'entraînement	Performance de test	validation	Fonction d'activation couche caché	Fonction d'activation couche de réponse
MLP 91-14-1	0,789423	0,735817	0,734096	Tanh	Exponential
MLP 91-16-1	0,782360	0,750799	0,741218	Logistic	Exponential
MLP 91-18-1	0,771790	0,768473	0,732590	Logistic	Tanh
MLP 91-15-1	0,773254	0,741931	0,735233	Logistic	Logistic
MLP 91-9-1	0,774957	0,766555	0,747487	Exponential	Logistic

Le graphique suivant présente les valeurs estimées des différents réseaux en fonction des valeurs observées, le modèle avec réseaux neurones est plus satisfaisant que le modèle de régression multiple.

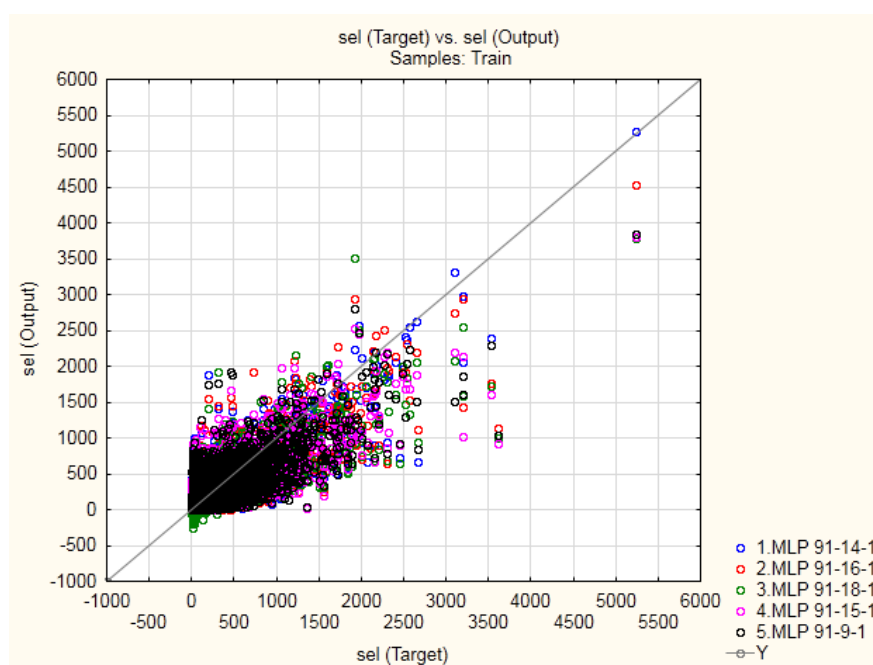


Figure 4.18: Valeurs observées en fonction des valeurs prédites (réseaux de neurone)

### 4.4.3 Arbre de classification

Connu aussi sous le nom d'arbre de décision, c'est une méthode qui permet de trouver une segmentation ou un partitionnement des individus en le présentant sous la forme d'un arbre de décision, l'objectif étant de prédire la valeur d'une caractéristique en fonction des autres.

La première manipulation à faire pour effectuer une étude basée sur l'arbre de classification est de transformer la réponse continue (quantité de fondants et d'abrasifs) en une réponse par catégorie. Pour cela, en utilisant l'histogramme de la réponse (figure 4.19) on partitionne la réponse en 4 catégories.

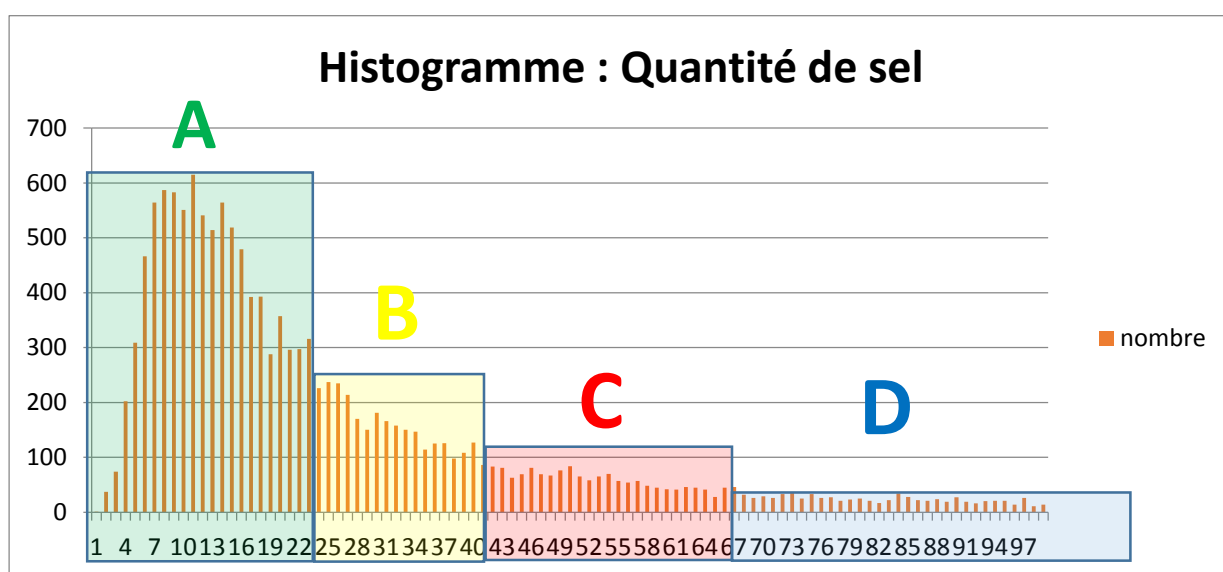


Figure 4.19: Histogramme de la quantité de sel en kg avec 4 catégories

Pour le modèle, on utilise Classification Random forest (interprétation facile) ce qui nous donne un taux d'erreur de classification de 33% pour les données d'apprentissage et 44.5% pour les données de test ce qui n'est pas satisfaisant, le graphique ci-dessous (figure 4.20) montre le taux d'erreur en fonction du nombre d'arbres.

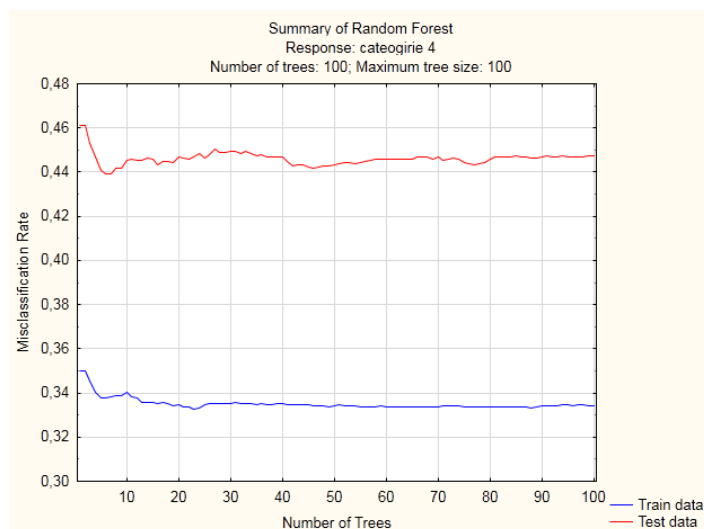


Figure 4.20: Taux d'erreur de la classification pour 4 catégories

Le graphique suivant (figure 4.21) montre le classement des facteurs en fonction de leur importance dans le modèle :

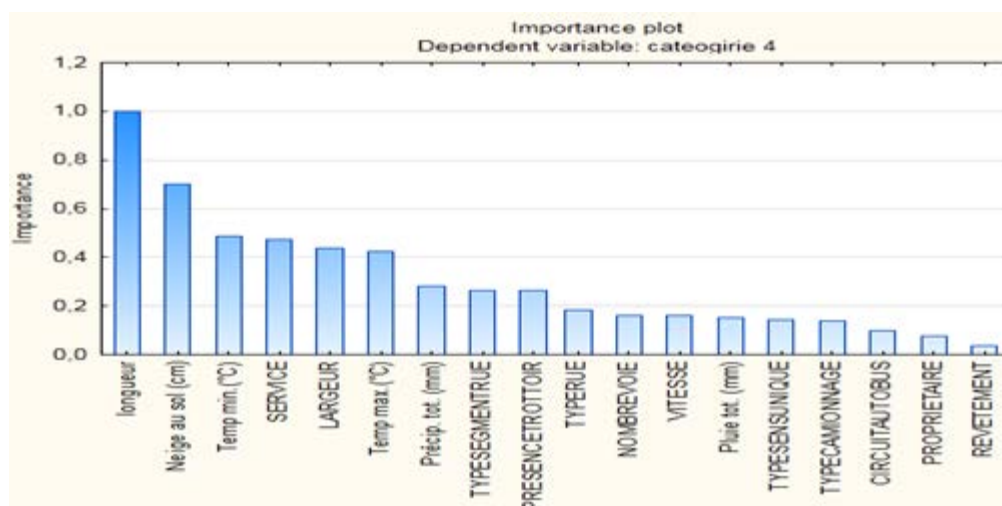


Figure 4.21: Importance des facteurs dans le modèle

Le facteur le plus important est la longueur des segments de rues suivi par la hauteur de neige au sol et de la température minimale de la journée .

La figure 4.22 présente la matrice de classification, qui montre les valeurs observées en fonction des valeurs prédites, d'après le graphique on remarque qu'il n'y a pas de valeurs prédites dans la catégorie B ainsi que la présence du chevauchement entre les catégories.

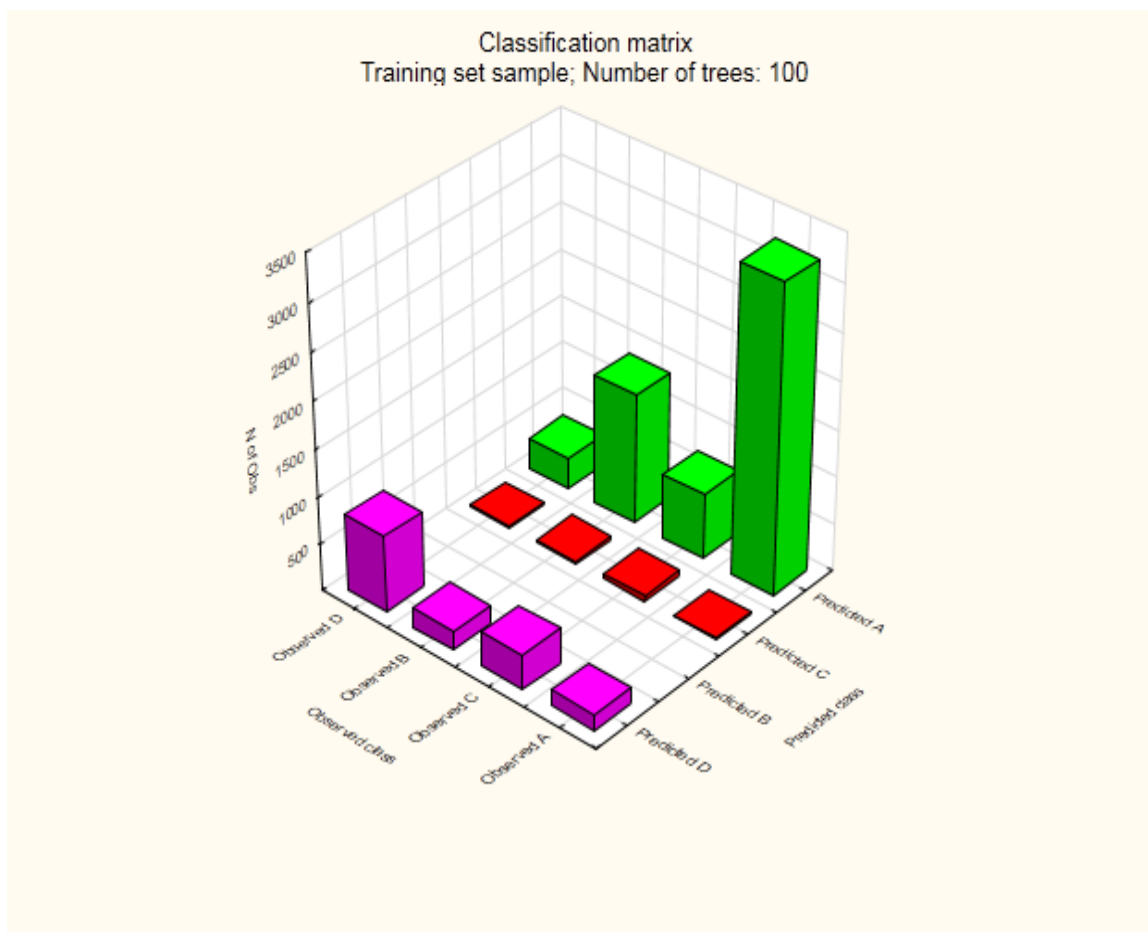


Figure 4.22: Matrice de classification avec 4 catégories

### Arbre de classification :

L'arbre de classification (figure 4.23) pour l'étude avec 4 catégories génère 69 nœuds, ce qu'il ne nous permet pas de l'afficher correctement, par contre la structure de l'arbre (annexe A) donne plus de détails.

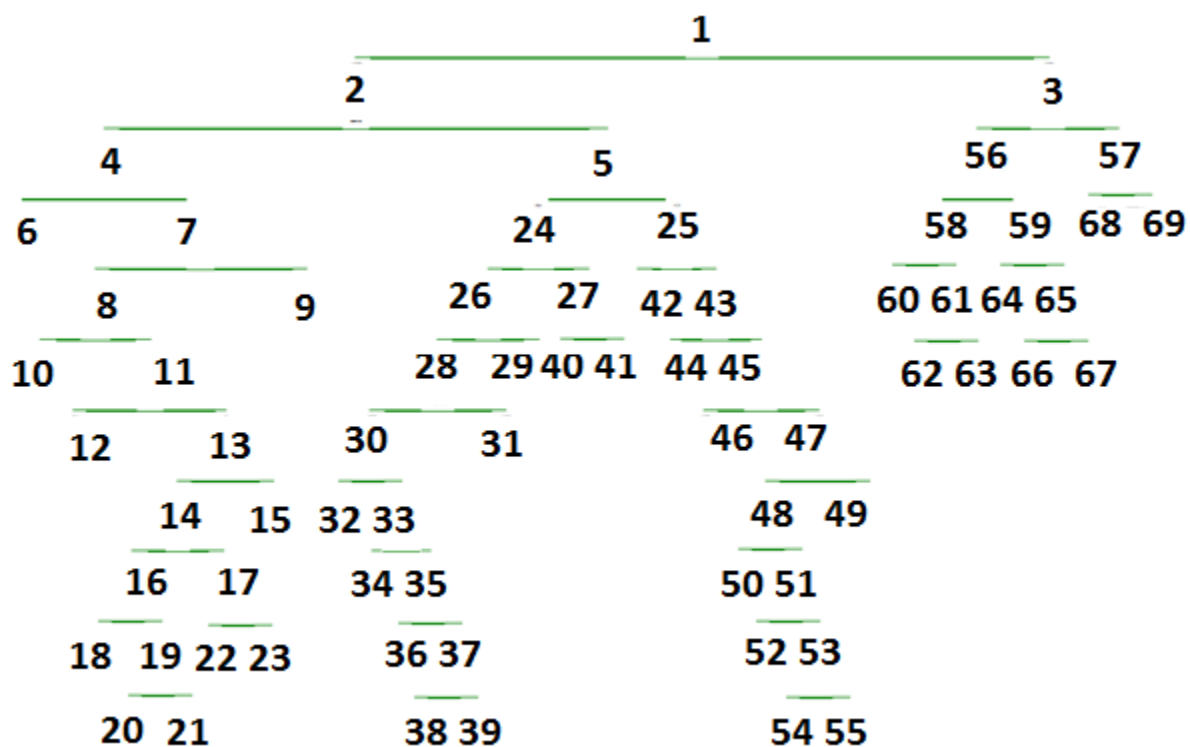


Figure 4.23: Arbre de classification avec 4 catégories

Lors de la prochaine étude, on va prendre en consideration seulement 3 catégories au lieu de 4 catégories.

Étude avec 3 catégories :

Cette fois-ci on partitionne l'histogramme en trois catégories figure 4.24 :

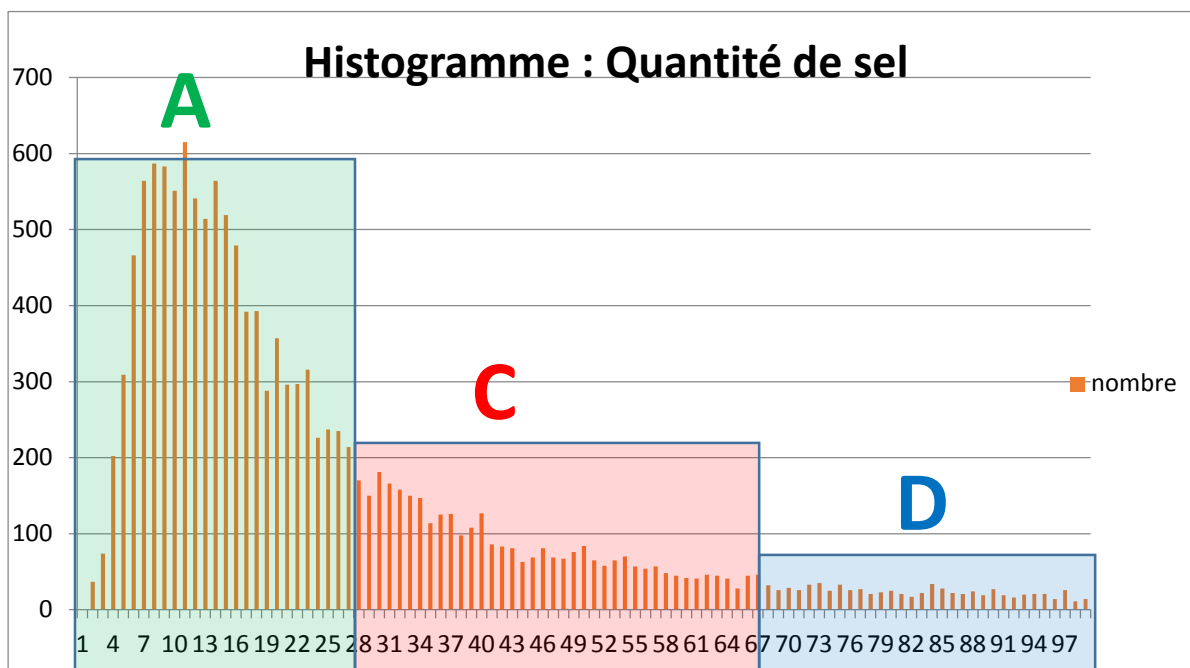


Figure 4.24: Histogramme de la quantité de sel avec 3 catégories

La figure 4.25 montre que la nouvelle étude avec 3 catégories est plus précise avec un taux d'erreur de 34%

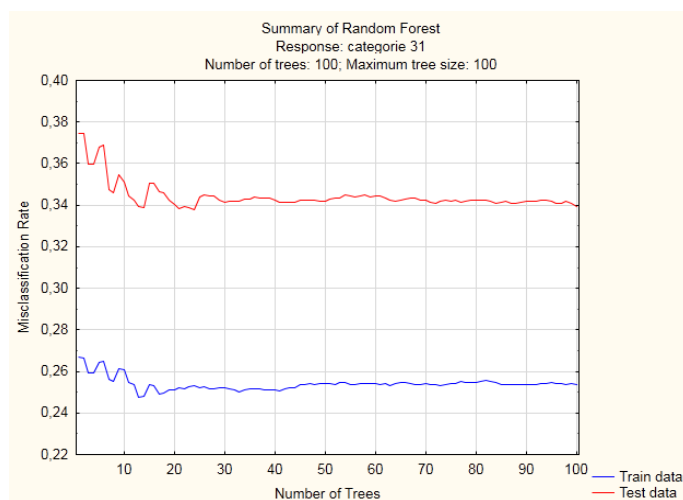


Figure 4.25: Taux d'erreur de la classification pour 3 catégories



La matrice de classification pour 3 catégories (figure 4.26) nous montre qu'il existe encore un chevauchement entre les catégories.

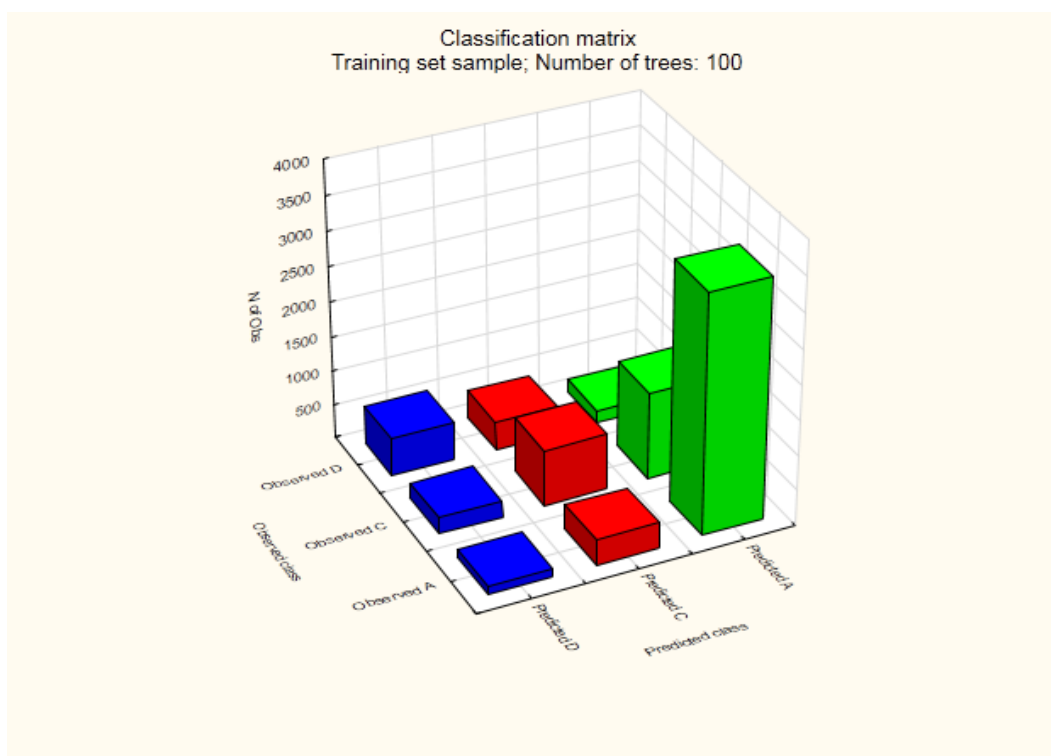


Figure 4.26: Matrice de classification avec 3 catégories

La figure 4.27 montre le classement des facteurs en fonction de leur importance dans le modèle :

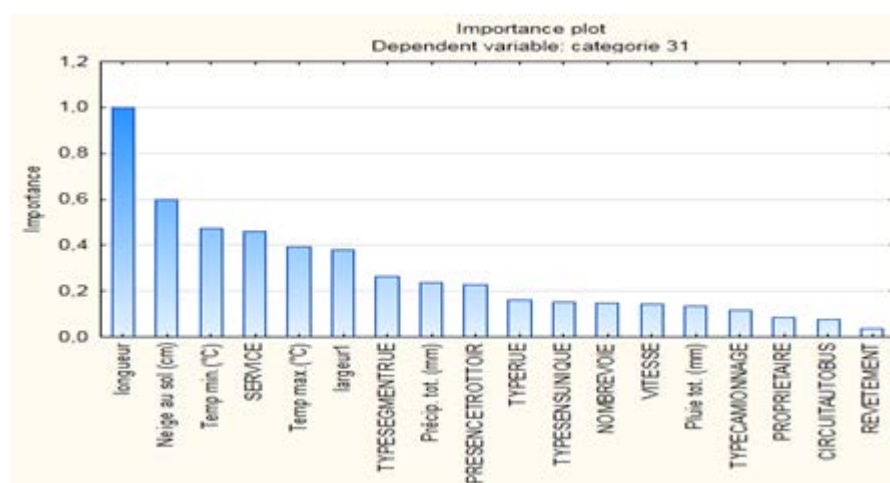


Figure 4.27: Importance des facteurs dans le modèle

On observe que le facteur le plus important est la longueur des segments de rues suivi par la hauteur de neige au sol et de la température minimale de la journée.

### Arbre de classification :

L'arbre de classification (figure 4.28) pour l'étude avec 3 catégories génère 51 nœuds ce qui ne nous permet pas de l'afficher correctement, par contre la structure de l'arbre (annexe B) donne plus de détails.

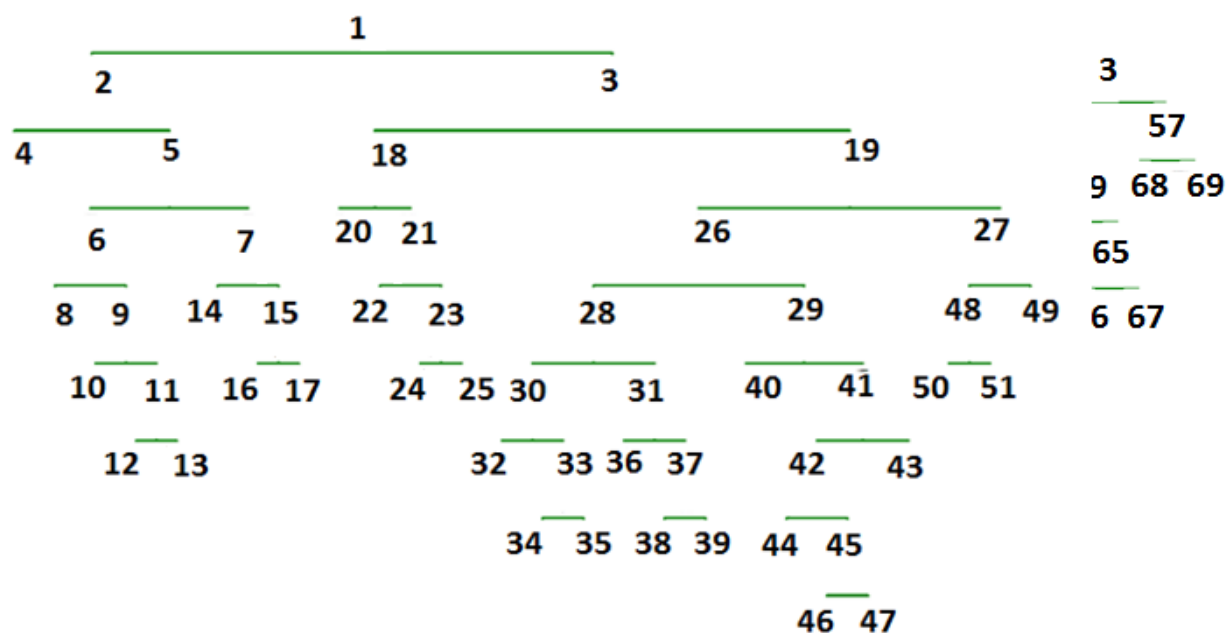


Figure 4.28 : Arbre de classification avec 3 catégories

## CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Bien que plusieurs municipalités possèdent des équipements de télémétrie permettant de suivre à la trace leurs véhicules dédiés au déneigement, il demeure extrêmement complexe d'exploiter ces données à fond afin de compiler, de façon automatique, des indicateurs de performance pertinents. Dans ce projet de recherche, nous proposons des méthodes de traitement de données qui arrivent à calculer de façon transparente des indicateurs de performance sur les opérations d'épandage dans le cadre de la viabilité hivernale.

Ces indicateurs de performance développés ont été classés en deux parties :

- la première partie concerne les indicateurs de performance pour les segments de rues : quantité épandue, vitesse de pose, consommation de carburant, taux de pose, méthode pour estimer le nombre de passages de véhicules sur chaque segment de rue, etc.
- la deuxième partie concerne les indicateurs de performance pour chaque secteur : quantité épandue, consommation de carburant, Taux de service, efficacité des tournées, taux d'épandage, etc.

Malgré l'utilisation des tampons afin de régler le problème de précisions des données, il reste encore des erreurs mineures concernant les indicateurs de performances par segment de rue, cependant elles ne sont pas significatives,

La deuxième phase du projet était de développer des modèles de prédiction de quantité de fondants et d'abrasifs. Malheureusement, seul le modèle avec le réseau de neurone était moyennement satisfaisant avec un taux de validation de 75%.

Notre objectif était d'avoir une estimation plus précise des quantités de matériel d'épandage pour chaque segment de rue, mais en revanche il fallait avoir plus d'informations sur d'autres facteurs importants (température de surface, vitesse de vent, humidité, données métrologique horaire...).

Outre l'amélioration des méthodes de système d'information géographique utilisées pour l'appariement des tournées, nous avons identifié trois principales perspectives de recherche concernant l'amélioration des opérations de déneigement à partir de ces indicateurs dérivées de la télémétrie.

En premier lieu, il sera intéressant d'améliorer le modèle en prenant en compte d'autres facteurs s'il est possible (température de surface, vitesse de vent, humidité, données métrologique horaire...).

En second lieu, on pourrait améliorer certains indicateurs comme ceux de l'efficacité des tournées pour lesquels on pourrait enlever les retours au garage, on pourrait également améliorer le taux de service en améliorant l'estimation de la vitesse moyenne durant l'épandage.

Enfin, une étude approfondie des traces GPS et leur conversion en réseau analytique permettront de développer des algorithmes de confection de parcours d'épandage basé sur des paramètres réels, tenant compte des particularités opérationnelles du territoire de la municipalité.

Somme toute, les contributions de ce projet de recherche sont :

- le développement pour la première fois d'indicateurs de performance touchant les segments de rues ;
- le développement d'une nouvelle méthode pour estimer le nombre de passage des camions pour chaque segment ;
- le développement de nouveaux indicateurs pour calculer les performances des opérations de déneigement ;
- l'élaboration pour la première fois de modèles de prédiction qui estiment la quantité de sel par segment de rue.

## BIBLIOGRAPHIE

- Adams, T. M., M. Danijarsa, T. Martinelli, G. Stanuch and A. Vonderohe (2003). Performance Measures for Winter Operations, National Research Council.
- Agard, B. (2015). Exploration de données industrielles. Montréal: École polytechnique de Montréal.
- Borcard, D. (2015, 11 15). umontreal. Récupéré sur Département de sciences biologiques: [http://biol09.biol.umontreal.ca/BIO2042/Regr\\_mult.pdf](http://biol09.biol.umontreal.ca/BIO2042/Regr_mult.pdf)
- Barber, E. S. (1957). "Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports." Highway Research Board Bulletin(168).
- Blomqvist, G., M. Gustafsson, M. Eram and K. Ünver (2011). "Prediction of Salt on Road Surface: Tool to Minimize Use of Salt." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(2258): 131-138.
- Calgary. (2009). Snow and ice control policy. Calgary, Canada: Roads Unit.
- Clément, B. (2015, 11 15). Analyse de la variance. Montréal: École polytechnique de Montréal. Récupéré sur <http://www.groupe.polymtl.ca/mth6301/mth8302/ModREG/ch03-REG-Multiple1.pdf>
- Diefenderfer, B. K., I. L. Al-Qadi and S. D. Diefenderfer (2006). "Model to predict pavement temperature profile: development and validation." Journal of Transportation Engineering 132(2): 162-167.
- Drawil, N., H. Amar, O. Basir and Ieee (2011). "A Solution to the Ill-Conditioned GPS Accuracy Classification Problem: Context Based Classifier." 2011 Ieee Globecom Workshops (Gc Wkshps): 1077-1082.
- Edmonton. (2009). Snow and ice control cost effectiveness. Edmonton Canada: Office of the City Auditor.
- Edmonton. (2010). Winter road maintenance program, Transportation Dept. Edmonton, Canada: Transportation Dept.
- Edmonton. (2013, juillet 15). City of Edmonton. Récupéré sur [www.edmonton.ca: http://www.edmonton.ca/transportation/on\\_your\\_streets/winter-road-maintenance-faq.aspx#25787](http://www.edmonton.ca/transportation/on_your_streets/winter-road-maintenance-faq.aspx#25787)
- Fu, L., M. Trudel and V. Kim (2009). "Optimizing winter road maintenance operations under real-time information." European Journal of Operational Research 196(1): 332-341.
- Gabriel, C. (2015, 11 15). umoncton. Récupéré sur [http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier\\_gabriel/SystemesIntelligents/GIND5439\\_Chapitre6.pdf](http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/SystemesIntelligents/GIND5439_Chapitre6.pdf)
- Hallmark, S. L., W. G. Schuman, S. W. Kadolph and R. Souleyrette (2003). Integration of Spatial Point Features with Linear Referencing Methods, National Research Council.
- Handa, H., L. Chapman and X. Yao (2005). Dynamic salting route optimisation using evolutionary computation. 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE CEC 2005,

LaBarre, M.-O. (2015, 11 15). uqtr. Récupéré sur [www.uqtr.quebec.ca/~biskri/Personnel/mol/RRN.doc](http://www.uqtr.quebec.ca/~biskri/Personnel/mol/RRN.doc)

September 2, 2005 - September 5, 2005, Edinburgh, Scotland, United kingdom, Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.

Hong, S. and A. P. Vonderohe (2011). "Uncertainty issues in integrating geographic information systems and the global positioning system for transportation." *Transportation Research Record*(2215): 50-58.

Hosseini, F., S. K. Hossain, L. Fu, M. Johnson and Y. Fei (2015). Prediction of Pavement Surface Temperature Using Meteorological Data for Optimal Winter Operations in Parking Lots. Cold Regions Engineering 2015@ sDeveloping and Maintaining Resilient Infrastructure, ASCE.

Li, L. Y. O. and R. W. Eglese (1996). "An interactive algorithm for vehicle routeing for winter-gritting." *Journal of the Operational Research Society* 47(2): 217-228.

McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115-133.

Minhoto, M., J. Pais, P. Pereira and L. Picado-Santos (2005). "Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1919): 96-110.

Montréal. (2013, juillet 15). Ville de Montréal. Récupéré sur Ville Montréal: [http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?\\_pageid=8397,94625705&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=8397,94625705&_dad=portal&_schema=PORTAL)

Nassiri, S., A. Bayat and S. Salimi (2015). "Survey of practice and literature review on municipal road winter maintenance in Canada." *Journal of Cold Regions Engineering* 29(3).

Neely, A., M. Gregory and K. Platts (2005). "Performance measurement system design: A literature review and research agenda." *International Journal of Operations & Production Management* 25(12): 1228-1263.

Ottawa. (2013, juillet 15). Ottawa air quality and climate change management plan. Ottawa. Récupéré sur <http://ottawa.ca/sites/ottawa.ca/files/migrated/files/cap078824.pdf>

Ottawa. (2013, Juillet 15). Salt and Sand. Ottawa. Récupéré sur <http://ottawa.ca/en/residents/transportation-and-parking/road-and-sidewalk-maintenance/salt-and-sand>

Ottawa. (2013, juillet 15). Snow removal and disposal. Ottawa. Récupéré sur <http://ottawa.ca/en/residents/transportation-and-parking/road-and-sidewalk-maintenance/snow-removal-and-disposal>

Perrier, N., Langevin, A., & Campbell, J. F. (2006a). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part I: system design for spreading and plowing. *Computers & Operations Research*, 33(1), 209-238.

Perrier, N., Langevin, A., & Campbell, J. F. (2006b). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part II: system design for snow disposal. *Computers & Operations Research*, 33(1), 239-262.

- Perrier, N., Langevin, A., & Campbell, J. F. (2007a). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part III: Vehicle routing and depot location for spreading. *Computers & Operations Research*, 34(1), 211-257.
- Perrier, N., Langevin, A., & Campbell, J. F. (2007b). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part IV: Vehicle routing and fleet sizing for plowing and snow disposal. *Computers & Operations Research*, 34(1), 258-294.
- Pickrell, S. and L. Neumann (2001). *USE OF PERFORMANCE MEASURES IN TRANSPORTATION DECISION MAKING*. Performance Measures to Improve Transportation Systems and Agency Operations, TRB, National research council, Washinton, D.C.
- Rakotomalala, R. (2015, 11 15). univ-toulouse. Récupéré sur [http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/Regression\\_Lineaire\\_Multiple.pdf](http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/Regression_Lineaire_Multiple.pdf)
- Rakotomalala, R. (2005). Arbres de décision. *Revue Modulad*, 33, 163-187.
- Rao, T. M., S. Mitra and J. Zollweg (2011). Snow-plow route planning using AI search. 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2011, October 9, 2011 - October 12, 2011, Anchorage, AK, United states, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Roosevelt, D. S., R. A. Hanson and W. M. Campenni (2001). "Automatic vehicle location system in urban winter maintenance operations." *Transportation Research Record*(1741): 6-10.
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological review*, 65(6), 386.
- Rumney, T. N. and R. Jimenez (1971). "Pavement temperatures in the southwest." *Highway Research Record*(361).
- Slone, S. (2014, June 27). High Costs of Winter Road Maintenance. knowledge center. Récupéré sur <http://knowledgecenter.csg.org/kc/content/high-costs-winter-road-maintenance-2013%E2%80%93314>
- Straek, R. (2013). A tool for active FLEET management and analysis of activities of a snow Plowing and a road salting fleet. 2013 World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS 2013, October 23, 2013 - October 25, 2013, San Francisco, CA, United states, Newswood Limited.
- Sugumaran, R., M. Salim, T. Strauss and C. Fulcher (2005). Web-based implementation of a winter maintenance decision support system using GIS and remote sensing.
- Toronto. (2004). Salt management plan city of Toronto works and emergency services. Toronto. Canada: Transportation Services Div.
- Toronto. (2010). budget briefing note winter maintenance—Road salt usage and expenditures. Toronto: Transportation Services Div.
- Toronto. (2013, juillet 15). Infrastructure Toronto. Récupéré sur [toronto: http://www.toronto.ca/toronto\\_facts/infrastructure.htm](http://www.toronto.ca/toronto_facts/infrastructure.htm)
- Toronto. (2013). Snow management. Toronto. Canada: Transportation Services . Récupéré sur <http://www.toronto.ca/transportation/snow>

Trépanier, M. (2015). Cours de Système de transport intelligent. Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Tukey, J. W. and P. A. Tukey (1988). "Computer graphics and exploratory data analysis: An introduction." *The Collected Works of John W. Tukey: Graphics: 1965-1985* 5: 419.

ville de Granby. (2015, 11 04). Récupéré sur ville de Granby: <http://www.ville.granby.qc.ca/fr/ville/nav/finances/budget.html>

Wang, J.-Y. and J. R. Wright (1994). "Interactive design of service routes." *Journal of Transportation Engineering* 120(6): 897-913.

Weiss, M. A., G. Petit, Z. Jiang and Ieee (2005). A comparison of GPS common-view time transfer to all-in-view. 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exhibition: 324-328.



## ANNEXE A - STRUCTURE DE L'ARBRE A 4 CATEGORIES

Tree Structure (Untitled1 (B2:VBC14927))															
Response: categorie 4															
Tree number: 1															
	Child node 1	Child node 2	Size of node	N in class A	N in class C	N in class B	N in class D	selected Category	Split variable	Split constant	Split category	Split category	Split category	Split category	Split category
1	2	3	5829	3594	581	1094	560	A	Neige au sol (cm)	9,5000					
2	4	5	4136	2132	564	881	559	A	SERVICE		0	1	11	15	
4	6	7	1321	365	284	292	380	D	Temp max.(°C)	-5,2000					
6			51	40	3	8	0	A							
7	8	9	1270	325	281	284	380	D	LARGEUR	7,9689					
8	10	11	1129	253	261	250	365	D	Temp min.(°C)	-10,7500					
10			26	20	0	5	1	A							
11	12	13	1103	233	261	245	364	D	VITESSE		70	80			
12			122	27	13	16	66	D							
13	14	15	981	206	248	229	298	D	Temp max.(°C)	3,2500					
14	16	17	963	194	247	224	298	D	longeur1	195,0000					
16	18	19	566	162	157	172	75	B	Temp max.(°C)	-3,2500					
18			32	21	2	7	2	A							
19	20	21	534	141	155	165	73	B	longeur1	115,0000					
20			279	88	59	106	26	B							
21			255	53	96	59	47	C							
17	22	23	397	32	90	52	223	D	longeur1	345,0000					
22			252	24	63	46	119	D							
23			145	8	27	6	104	D							
15			18	12	1	5	0	A							
9			141	72	20	34	15	A							
5	24	25	2793	1760	275	585	173	A	PRESENCETROTTOIR		3	4			
24	26	27	1545	1054	122	311	58	A	Temp max.(°C)	-0,5000					
26	28	29	1066	665	97	255	49	A	DJC (°C)	24,5000					
28	30	31	813	477	89	201	46	A	Précip. tot. (mm)	3,5000					
30	32	33	561	304	63	151	43	A	TYPERUE		2	3	11		
32			14	0	4	5	5	B							
33	34	35	547	304	59	146	38	A	TYPECAMIONNAGE		3				
34			17	4	2	7	4	B							
35	36	37	530	300	57	139	34	A	LARGEUR	8,8074					
36			141	99	9	33	0	A							
37	38	39	389	201	48	106	34	A	Temp max.(°C)	-1,5000					
38			259	136	29	77	17	A							
39			130	65	19	29	17	A							
31			252	173	26	50	3	A							
29			253	188	8	54	3	A							
27	40	41	479	389	25	56	9	A	Temp min.(°C)	-3,0000					
40			154	149	3	0	2	A							
41			325	240	22	56	7	A							
25	42	43	1248	706	153	274	115	A	Temp min.(°C)	-12,2500					
42			125	110	1	14	0	A							
43	44	45	1123	596	152	260	115	A	VITESSE		70				
44			70	23	8	11	28	D							
45	46	47	1053	573	144	249	87	A	NOMBREVOIE	1,5000					
46			106	101	0	5	0	A							
47	48	49	947	472	144	244	87	A	Temp max.(°C)	3,2500					
48	50	51	908	438	144	240	86	A	LARGEUR	7,0592					
50			47	39	3	4	1	A							
51	52	53	861	399	141	236	85	A	SERVICE		4	5			
52			243	148	27	57	11	A							
53	54	55	618	251	114	179	74	A	Temp max.(°C)	2,7500					
54			600	250	104	175	71	A							
55			18	1	10	4	3	C							
49			39	34	0	4	1	A							
3	56	57	1693	1462	17	213	1	A	Neige au sol (cm)	31,5000					
56	58	59	1197	1005	14	177	1	A	Temp min.(°C)	-9,5000					
58	60	61	746	593	9	144	0	A	LARGEUR	8,0202					
60			166	108	5	53	0	A							
61	62	63	578	484	4	90	0	A	type		sel				
62			212	194	1	17	0	A							
63			366	290	3	73	0	A							
59	64	65	451	412	5	33	1	A	type de rue		cycleway	secondary			
64			5	2	0	3	0	B							
65	66	67	446	410	5	30	1	A	LARGEUR	9,1806					
66			159	137	4	17	1	A							
67			283	269	1	13	0	A							
57	68	69	496	457	3	36	0	A	SERVICE		1	12			
68			217	188	1	28	0	A							
69			277	267	2	8	0	A							

## ANNEXE B –STRUCTURE DE L'ARBRE A 3 CATEGORIES

Tree Structure (Untitled1 (B2:VBC14927)) Response: categorie 31 Tree number: 1														
	Child node 1	Child node 2	Size of node	N in class A	N in class C	N in class D	selected Category	Split variable	Split constant	Split category	Split category	Split category	Split category	Split category
1	2	3	5897	4045	1272	580	A	Temp min.(°C)	-10,2500					
2	4	5	1527	1403	123	1	A	SERVICE		1	11			
4			291	242	48	1	A							
5	6	7	1232	1158	74	0	A	Neige au sol (cm)	27,5000					
6	8	9	654	598	56	0	A	PRESENCETROTTOIR		2				
8			48	37	11	0	A							
9	10	11	606	561	45	0	A	type de rue		tertiary	path	primary	unclassified	
10			52	52	0	0	A							
11	12	13	554	509	45	0	A	type		sel				
12			230	224	6	0	A							
13			324	285	39	0	A							
7	14	15	578	560	18	0	A	DJC (°C)	26,3750					
14			50	42	8	0	A							
15	16	17	528	518	10	0	A	largeur1	7,5000					
16			29	26	3	0	A							
17			499	492	7	0	A							
3	18	19	4370	2642	1149	579	A	NOMBREVOIE	1,5000					
18	20	21	545	450	67	28	A	SERVICE		0	11			
20			48	22	21	5	A							
21	22	23	497	428	46	23	A	type de rue		tertiary	cycleway	primary		
22			52	27	9	16	A							
23	24	25	445	401	37	7	A	TYPESENSUNIQUE		0	2			
24			120	118	2	0	A							
25			325	283	35	7	A							
19	26	27	3798	2181	1072	545	A	PRESENCETROTTOIR		1				
26	28	29	2221	1050	699	472	A	SERVICE		1	11			
28	30	31	1323	480	458	385	A	longeur1	195,0000					
30	32	33	736	348	293	95	A	type		mixtB				
32			11	11	0	0	A							
33	34	35	725	337	293	95	A	longeur1	65,0000					
34			33	28	5	0	A							
35			692	309	288	95	A							
31	36	37	587	132	165	290	D	TYPECAMIONNAGE		5				
36			22	17	1	4	A							
37	38	39	565	115	164	286	D	Temp max.(°C)	0,2500					
38			470	67	142	261	D							
39			95	48	22	25	A							
29	40	41	898	570	241	87	A	Temp min.(°C)	-9,8500					
40			24	4	16	4	C							
41	42	43	874	566	225	83	A	Temp max.(°C)	0,2500					
42	44	45	753	455	218	80	A	longeur1	125,0000					
44			337	278	50	9	A							
45	46	47	416	177	168	71	A	SERVICE		9	12	15		
46			222	75	81	66	C							
47			194	102	87	5	A							
43			121	111	7	3	A							
27	48	49	1577	1131	373	73	A	Temp max.(°C)	-0,7500					
48	50	51	1020	669	291	60	A	longeur1	115,0000					
50			500	395	102	3	A							
51			520	274	189	57	A							
49			557	462	82	13	A							